

**ESEIAAT**  
**TRABAJO DE FINAL DE GRADO**



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA**  
**BARCELONATECH**

**Escola Superior d'Enginyeries Industrial,  
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa**

**Grado:** Ingeniería de Sistemas Audiovisuales

**Estudiante:** Irene Nus Santos

---

**ESTUDIO Y DISEÑO DE ANTENA  
WEARABLE SIGFOX PARA  
APLICACIONES IOT**

---

**Director:** Ignacio Gil Galí

**Fecha de entrega:** 10/06/2019

## **AGRADECIMIENTOS**

Primero de todo, agradecer al profesor Ignacio Gil por proponerme el trabajo y ofrecerme su ayuda durante todo el periodo de trabajo. También agradecerle la paciencia por mis rápidos y fugaces agobios. Además de su dedicación y pasión por las antenas como profesor de la asignatura Emisores y Receptores, que me hizo elegir este proyecto y a él como tutor.

Muchas gracias a Marc Martínez por ayudarme a bordar las antenas y hacerme comprender un poco más sobre tejidos, un placer trabajar contigo.

Agradecer también a mi familia y compañeros de piso por el apoyo y ayuda al largo de la carrera, que hacen más ameno el día a día.

## Resumen

En este proyecto de investigación se ha diseñado, simulado, llevado a cabo y medido dos antenas planares, tipo MIFA, para una frecuencia de 868MHz, ya que es una banda de frecuencia libre utilizada en Europa y la que utiliza Sigfox.

Actualmente, se están empezando a comercializar diferentes tipos de weareables, que nos ayudan en nuestra vida cotidiana en ciertos aspectos tanto de necesidad, como de comodidad. Y concretamente, las antenas textiles se están empezando a investigar y su número en el mercado es reducido.

El objetivo del trabajo será bordar la antena, previamente diseñada, en un sustrato tejano, sin que varíe sus resultados obtenidos en la simulación. Siempre intentando que no afecte al cuerpo humano, es decir, que no se sobrepase del límite de energía absorbida por el tejido.

Se mostrarán los resultados simulados con el software CST Studio Suite y los diferentes resultados medidos con la maquinaria adecuada, una vez bordada la antena. También se calcularán las tasas de absorción en el cuerpo humano, para comprobar que las antenas sean seguras. Se compararán las diferentes antenas realizadas y se llegará a una conclusión de cuál es la mejor.

## **ABSTRACT**

In this research Project, two PIFA planar antennas have been designed, simulated, accomplished and measured for an 868MHz of frequency because it's a free radio spectrum used in Europe and used by Sigfox.

Nowadays, some kind of wearables had been commercialised, which daily aid us in our lives, in some aspects, as necessity and comfort. And in particular, textile antennas had been investigated and they will be more commercialised.

The purpose of this Project is to embroider the antennas, previously designed, in a denim substrate, without change the results from the simulation. Trying to minimally affect to the human body, meaning it can't overtake the limit of the energy absorbed by the tissue.

Once the antenna had been embroidered, we will show the different measured results by the appropriate equipment and some previous simulations by the CST Studio Suite. We also will calculate the absorption rate in the human body, to verify the security of the antennas. Finally, we will compare the different realized antennas and we will decide which one is the best option.

## DECLARACIÓN DE HONOR

I declare that,

the work in this Degree Thesis is completely my own work,

no part of this Degree Thesis is taken from other people's work without giving them credit,

all references have been clearly cited,

I'm authorised to make use of the company's / research group  
(*choose one*) related information I'm providing in this document  
(*select when it applies*).

I understand that an infringement of this declaration leaves me subject to the foreseen disciplinary actions by *The Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTECH*.

Irene Nus Santos



9/06/2019

Student Name

Signature

Date

Title of the Thesis: ESTUDIO Y DISEÑO DE ANTENA WEARABLE  
SIGFOX PARA APLICACIONES IOT

# Índice

1. Introducción .....	1
1.1 Objetivo .....	1
1.2 Alcance .....	1
1.3 Requerimientos .....	2
1.4 Justificación y utilidad.....	2
2. Desarrollo .....	3
2.1 Antecedentes y Estado del arte .....	3
3. Planteamiento.....	4
3.1 Bandas de frecuencia.....	4
3.2 ISM.....	5
3.3 Tipos de antena .....	6
3.4 Sigfox .....	9
3.5 Antenas Textiles.....	10
3.5.1 Materiales y técnicas de producción.....	11
3.5.2 Topologías de antenas .....	12
3.6 Parámetros de las antenas .....	12
3.6.1 Impedancia .....	13
3.6.2 Ancho de banda.....	13
3.6.3 Patrón de radiación.....	14
3.6.4 Polarización .....	16
3.6.5 Directividad.....	16
3.6.6 Ganancia .....	16
3.6.7 Eficiencia .....	17
3.6.8 Parámetros de dispersión .....	17
3.7 SAR.....	18
3.8 Materiales.....	20
3.8.1 Tejano.....	20
3.8.2 <i>Hilo de Plata</i> .....	20
3.9 Software .....	21
3.9.1 CST Studio Suite .....	21
3.9.2 CST MW Studio .....	21
3.9.3 Gerbview .....	22
3.9.4 Digitizer EX.....	23

3.10	Maquinaria .....	23
3.10.1	Singer Futura XL-550 .....	23
3.10.2	RF Diagnostic Chamber ROHDE & SCHWARZ .....	24
3.10.3	Fieldfox N9916A Microwave analyzer.....	25
3.10.4	Agilent Technologies CalKit 85521A.....	26
3.10.5	TENMA 72-7730A - Multímetro Digital.....	26
4.	Metodología .....	27
4.1	IFA.....	27
4.2	PIFA .....	28
4.3	MIFA.....	28
4.4	Materiales utilizados.....	29
4.5	Modelaje de la antena .....	29
4.6	Resultados de la simulación.....	33
4.6.1	Prueba4 .....	33
4.6.2	Prueba3 .....	36
4.7	Resultados moldeando la antena.....	38
4.7.1	Prueba4 .....	39
4.7.2	Prueba3 .....	40
4.8	Resultados SAR.....	41
4.8.1	Child .....	42
4.8.2	Emma .....	45
4.8.3	Gustav .....	47
4.8.4	Laura .....	50
5.	Procedimiento práctico .....	52
5.1	Confección de la antena.....	52
5.2	Resultados Prácticos.....	56
6.	Cronograma.....	62
7.	Presupuesto.....	62
8.	Aspectos .....	64
8.1	Aspectos ambientales .....	64
8.2	Aspectos de seguridad.....	64
9.	Conclusiones .....	65
10.	Futuros Estudios.....	65
11.	Bibliografía.....	67
ANEXO 1: TERMS OF REFERENCE .....		71
Objetivo.....		71

Requerimientos.....	71
Ficha técnica.....	72
Materiales .....	72
Estructura .....	72



## Lista de Tablas

Tabla 1: Características del tejido del tejano.....	20
Tabla 2: Medidas de los parámetros de la antena Prueba4 .....	31
Tabla 3: medidas de los parámetros Prueba3.....	32
Tabla 4: Comparaciones de los resultados de la antena Prueba4 moldado con diferentes radios .....	39
Tabla 5: Comparativa de los resultados de la antena Prueba3 moldado con diferentes radios... ..	40
Tabla 6: Resultados del modelo Child.....	43
Tabla 7: Comparativa y resultados SAR del sujeto Emma .....	45
Tabla 8: Comparativa y resultados del SAR con el modelo Gustav.....	48
Tabla 9: Comparativa y resultados del SAR con el modelo Laura.....	50
Tabla 10: Presupuesto.....	63

## Lista de Figuras

Figura 1: Antena textil militar fabricada por la Universidad Estatal de Ohio.....	4
Figura 2: Rangos de frecuencia y servicios típicos para cada uno de ellos.....	5
Figura 3: Tipos de antena a) Monopolo b) Dipolo c) Yagi-Uda d) Espira e) Helicoidal ..	7
Figura 4: a) Antena Reflectora [11] b) Antena Lente .....	7
Figura 5: Antena parche Microstrip .....	8
Figura 6: Antena Array.....	8
Figura 7: Esquema explicativo del funcionamiento de Sigfox.....	10
Figura 8 Antena Microstrip cosida en el sustrato de una bata .....	11
Figura 9: Fórmula del ancho de banda .....	13
Figura 10: Sistema de coordenadas esféricas .....	14
Figura 11: Tipos de patrones de radiación .....	15
Figura 12: Distribución de los lóbulos en un diagrama de radiación.....	15
Figura 13: Modelo del parámetro-S.....	17
Figura 14: Proceso del tejido según el incremento de temperatura.....	19
Figura 15: Tejano utilizado como sustrato.....	20
Figura 16: Ovillo del hilo de plata .....	21
Figura 17: módulos de cálculo del CST Studio Suite.....	22
Figura 18: Máquina de coser, Singer Futura XL-550.....	24
Figura 19 Cámara anecoica RF Diagnostic Chamber ROHDE & SCHWARZ vista desde el interior.....	25
Figura 20: Fieldfox N9916A Microwave analyzer .....	26
Figura 21: Agilent Technologies CalKit 85521A .....	26
Figura 22: Tenma 72-7730A .....	27
Figura 23: Antena IFA (izquierda), Antena PIFA (derecha) .....	28
Figura 24: Estructura de una antena tipo MIFA [31].....	29
Figura 25: Esquema de la antena Prueba3.....	30
Figura 26: Plano de la estructura de la antena Prueba4 .....	31
Figura 27: Plano de la estructura Prueba4.....	32
Figura 28: Gráfica Parámetro S11 de la Prueba4 .....	33
Figura 29: Representación de la eficiencia de la Prueba4 .....	34
Figura 30: Representación del Realized Gain en 3D de la Prueba4.....	34
Figura 31: Representación de la ganancia para cada frecuencia de la Prueba4.....	34
Figura 32: Representación de la directividad en 3D de la Prueba4.....	35
Figura 33: Representación del campo eléctrico de la Prueba4 .....	35

Figura 34: Gráfico del parámetro S11 de la Prueba3 .....	36
Figura 35: Gráfico de la eficiencia total de la Prueba3 .....	36
Figura 36: Representación 3D del Realized Gain de la Prueba3 .....	37
Figura 37: Representación de la ganancia para cada frecuencia de la Prueba3 .....	37
Figura 38: Representación 3D de la directividad de la Prueba3 .....	38
Figura 39: Representación del campo eléctrico de la Prueba3 .....	38
Figura 40: Prueba3 moldeada por un cilindro vacío de radio 70 mm .....	39
Figura 41: Representación de los diferentes S11 con los diferentes radios .....	40
Figura 42: Prueba4 moldeada por un cilindro vacío de radio 95 mm .....	41
Figura 43: Representación de los diferentes S11 con los diferentes radios .....	41
Figura 44: Tabla de los diferentes biomodelos Voxel que ofrece CST Studio para el estudio del SAR .....	42
Figura 45: Parámetro S11 de la Prueba3 con el modelo Child .....	43
Figura 46: Representación del SAR del modelo Child en 10g Prueba3 .....	43
Figura 47: Representación del SAR del modelo Child en 1g Prueba3 .....	44
Figura 48: Parámetro S11 de la Prueba4 con el modelo Child .....	44
Figura 49: Representación del SAR del modelo Child en 10g Prueba4 .....	44
Figura 50: Representación del SAR del modelo Child en 1g Prueba4 .....	45
Figura 51: Resultados parámetro S11 de la Prueba4 con el modelo Emma .....	46
Figura 52: Representación del SAR del modelo Emma en 10g Prueba4 .....	46
Figura 53: Representación del SAR del modelo Emma en 1g Prueba4 .....	46
Figura 54: Resultados parámetro S11 Prueba3 modelo Emma .....	47
Figura 55: Representación del SAR del modelo Emma en 10g Prueba3 .....	47
Figura 56 Representación del SAR del modelo Emma en 1g Prueba4 .....	47
Figura 57: Resultados parámetro S11 en la Prueba4 modelo Gustav .....	48
Figura 58: Representación del SAR del modelo Gustav en 10g Prueba4 .....	48
Figura 59: Representación del SAR del modelo Gustav en 1g Prueba4 .....	49
Figura 60: Resultados parámetro S11 de la Prueba3 modelo Gustav .....	49
Figura 61: Representación del SAR del modelo Gustav en 10g Prueba3 .....	49
Figura 62: Representación del SAR del modelo Gustav en 1g Prueba3 .....	50
Figura 63: Resultados parámetro S11 Prueba3 modelo Laura .....	51
Figura 64: Representación del SAR del modelo Laura en 1g Prueba3 .....	51
Figura 65: Representación del SAR del modelo Laura en 10g Prueba3 .....	51
Figura 66: Representación del parámetro S11 Prueba 4 modelo Laura .....	51
Figura 67: Representación del SAR del modelo Laura en 10g Prueba4 .....	52
Figura 68: Representación del SAR del modelo Laura en 1g Prueba4 .....	52
Figura 69: Bastidor de bordado para tensar la tela .....	53
Figura 70: Máquina de coser, bordando automáticamente la Prueba3 .....	53
Figura 71: Resultado del bordado Prueba4 hilo de plata en la parte superior de la máquina .....	54
Figura 72: Resultado del bordado Prueba3 hilo de plata en la parte superior de la máquina .....	54
Figura 73: Resultado del bordado Prueba4 hilo de plata en la parte inferior de la máquina .....	54
Figura 74: Resultado del bordado Prueba4 hilo de plata en la parte superior de la máquina y añadiendo cinta adhesiva de cobre .....	55
Figura 75: Medición parámetro S11 de forma práctica .....	55
Figura 76: Resultado parámetro S11 Prueba4 hilo metálico a arriba en la máquina de coser .....	56
Figura 77: Resultado parámetro S11 Prueba4 hilo metálico a abajo en la máquina de coser .....	56
Figura 78: Resultado parámetro S11 Prueba3 hilo metálico a arriba en la máquina de coser .....	57
Figura 79: Prueba4 con el conector soldado con estaño .....	58

Figura 80: Resultado parámetro S11 Prueba4 hilo metálico a arriba en la máquina de coser.....	58
Figura 81: Ganancia de la antena Prueba4 hilo metálico a arriba en la máquina de coser.....	59
Figura 82: Resultado parámetro S11 Prueba4 hilo metálico a abajo en la máquina de coser.....	59
Figura 83: Resultado ganancia Prueba4 hilo metálico a abajo en la máquina de coser .....	60
Figura 84: Resultado parámetro S11 Prueba3 hilo metálico a arriba en la máquina de coser.....	60
Figura 85: Resultado ganancia Prueba3 hilo metálico a arriba en la máquina de coser .....	61
Figura 86: Diagrama de Gantt.....	62
Figura 87: Esquema de la antena Prueba3.....	72
Figura 88: Plano de la estructura de la antena Prueba4 .....	73
Figura 89: Plano de la estructura Prueba4.....	74

## Lista de acrónimos

ISM: Industrial, Scientific and Medical

CST: Computer Simulation Technology

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

ITU: Unión Internacional de Telecomunicaciones

MF: Medium Frequency (300 kHz a 3 MHz)

HF: High Frequency (3 MHz a 30 MHz)

VHF: Very High Frequency (30 MHz a 300 MHz)

UHF: Ultra High Frequency (300 MHz a 3 GHz)

PIFA: planar inverted-F antenna

IoT: Internet of Things

UNB: Ultra Narrow Band

SAR: tasa de absorción

VSWR: Voltage Standing Wave Ratio

HPBW: Half Power Beam Width

FNBW: First Null Beam Width

ANSI: Instituto Nacional Estadounidense de Estándares

ICNIRP: Comisión Internacional sobre Protección Frente a Radiaciones No Ionizantes

GSM: Sistema global de comunicaciones móviles

IFA: inverted-F antenna

MIFA: meandered printed inverted-F



# 1. Introducción

## 1.1 Objetivo

El propósito principal de este proyecto es diseñar, simular, llevar a cabo y medir una antena wearable Sigfox, tipo textil, con el objetivo de integrarla en una prenda de ropa que a su vez vista una persona, todo ello con la finalidad de obtener la conexión de los objetos cotidianos a internet, con diferentes aplicaciones. En este caso, se ha propuesto para obtención de la geolocalización de dicha persona.

Para ello, tendremos que indagar en cómo interconectarlo, cómo va a radiar, cómo afectará a nuestro cuerpo, etc. En este proyecto, bordaremos la antena o antenas elegidas en un pantalón. También se mostrarán varias simulaciones con la antena bordada en la parte superior de la pierna, se ha elegido esta ubicación porque es una zona amplia y común de llevar dispositivos.

Una vez tengamos diseñada la antena, habrá que simularla con el software CST STUDIO SUITE y obtener un resultado deseado y adecuado, es decir, que todos los parámetros cumplan los requerimientos establecidos, haya una buena eficiencia, directividad y con una banda de frecuencia ISM a 868 MHz para poderlo conectar a la red Sigfox. Una vez terminada la simulación de la antena o varias antenas, dependiendo de si el estudio abarca a más posibilidades, se bordará la antena con hilo de plata en un sustrato de tejano, teniendo en cuenta los límites ya establecidos del campo eléctrico inducido radiado que acepta el cuerpo humano. Finalmente, se compararán y analizarán los resultados teóricos con las medidas tomadas con el equipamiento adecuado.

## 1.2 Alcance

Cada día somos más dependientes de las tecnologías y, por tanto, necesitamos sistemas de transmisión y recepción accesibles, cómodos, autónomos e inmediatos, lo cual hace referencia a las antenas. En estos últimos años se ha estado investigando cómo introducir las antenas en los tejidos y los parámetros para diseñarlas. En este campo, pueden confluir diferentes sectores de la industria y sus especialistas, como pueden ser especialistas textiles, electrónicos, diseñadores de ropa, moda y fabricantes, en hacer dispositivos que sean llevables en ropa con el propósito de aportar a la vida cotidiana de las personas comodidad a la par que iniciar la posibilidad de un nuevo mercado.

Primero de todo, deberemos hacer un estudio previo de las antenas realizadas en el sector textil y los tipos normalmente utilizados. Se deberá aprender a utilizar el software CST Studio e intentar simular diferentes antenas. Cuando tengamos una idea de lo que queremos hacer, deberemos plasmarla en el

software e ir modificando la forma de la antena hasta llegar a nuestros objetivos y requerimientos mediante diferentes simulaciones. Uno de los pasos más importantes, será valorar la tasa de absorción del cuerpo humano, esto nos indicará la seguridad de nuestra antena y cómo reaccionará al tejido humano y viceversa. Después, deberemos llevarlo a la práctica y medirlo con la maquinaria indicada.

## 1.3 Requerimientos

Para poder llevar a cabo el proyecto debemos simular el diseño con el software CST (Computer Simulation Technology) con el que podremos investigar las propiedades electromagnéticas de los componentes. Nuestra antena, a grandes rasgos, deberá cumplir con las especificaciones del parámetro S11, es decir que en la representación gráfica se observe un pico en la frecuencia elegida (868MHz) y tenga un valor por debajo de -10dB, además de una buena eficiencia y que su tasa de absorción corporal esté dentro de los límites establecidos por cada gobierno. Asimismo, para que la antena pueda ser útil y eficaz, deberemos tener la máxima ganancia posible y obtener un valor de directividad parecido al de la ganancia y consecuentemente una buena eficiencia. También se ha propuesto que su tamaño no supere los 15 cm de largo.

## 1.4 Justificación y utilidad

Cada vez estamos más interesados en las innovaciones tecnológicas y esto se ha aplicado en todos los ámbitos, incluso al mundo textil. Este trabajo es un avance y un estudio para el mundo de las antenas bordadas directamente a un sustrato y aplicarlo al mundo de la moda. Algo tan cotidiano como la ropa que utilizamos para vestirnos o abrigarnos, le añadiremos una antena que su función será transferir datos de geolocalización y así poderla aplicar a ámbitos científicos como podría ser personas con demencia. Estas personas muchas veces se encuentran desorientadas y no saben qué hacer, con este proyecto, se ayudará a que estas personas en un momento de desubicación puedan notificárselo a alguien y tengan la posibilidad de salir a la calle sin miedo a perderse o a desorientarse. Así como se puede aplicar para personas con falta de memoria, también se podría con niños, personas con discapacidad mental, gente que va a hacer excursiones o incluso para el ámbito militar, en soldados que van a expediciones.

Simplemente se añade un elemento a la prenda de ropa, sin comprometer las características de la pieza de ropa en sí, y así, la antena se pueda lavar o llevar. Esta prenda ofrecerá funciones que no sean propias de una prenda normal en adición a su función que es cubrir o abrigar el cuerpo. Puede, por ejemplo, obtener datos y transferir de forma Wireless y automáticamente a una unidad computacional externa o procesar datos en la prenda misma. Además, la ropa como medio para la tecnología es ideal porque es versátil, móvil,

universal y adaptable. Si seguimos investigando y promocionando estos tipos de wearables inteligentes, podrán reflejar un cambio de estilo de vida en muchos aspectos.

## 2. Desarrollo

### 2.1 Antecedentes y Estado del arte

Los textiles inteligentes son prendas aparentemente normales que se están desarrollando para detectar y reaccionar ante informaciones que nos puede dar el cuerpo, condiciones medioambientales, estímulos mecánicos, térmicos, químicos, fuentes eléctricas o magnéticas, principalmente con el objetivo de aportar un beneficio adicional al usuario [1]. Llevan integradas en el tejido funciones útiles que incorporan en la mayoría de los casos, elementos informáticos y de comunicaciones con tal de conectar ambas partes.

En el mercado ya han sido producidas antenas textiles que dan información fisiológica, como el ritmo cardíaco, la respiración, la temperatura, o envían localizaciones, movimientos, distancias recorridas etc.

Donde hay más demanda de estos wearables es en el ámbito militar, sanitario, seguridad laboral, deportivo, moda y productividad en la industria.

Actualmente, se están acordando convenios entre grandes marcas de ropa y empresas que se dedican a las tecnologías y a la comunicación. Como, por ejemplo, Levi's con Google: han modificado un modelo de la chaqueta Levi's Commuter y la han equipado con sensores y con un chip en la manga que permite mandar información a un smartphone [2]. El área táctil, hecha de tela inteligente jacquard, está insertada en la manga de la chaqueta. Este tejido está fabricado con hilos conductores que se cosen en una base de mezclilla y no le afecta el lavado ni los líquidos. El sensor detecta los movimientos en la manga y puede cambiar de canción y notificar de las indicaciones de Google maps, además en el caso de alejarse mucho del teléfono, identifica que este ha sido extraviado u olvidado y notifica de ello. Otra función, más enfocada a las personas que acostumbran a ir en bici, es que la chaqueta detecta el nivel de contaminación.

En marcas como Nevano UV Protect, han llegado a comercializar trajes de baño con un sensor que notifica cuando llevas demasiado tiempo expuesto al sol, teniendo en cuenta el tipo de piel que tengas [2].

En Estados Unidos, se ha desarrollado antenas radio cosidas directamente en la ropa con una función principal de uso militar [3]. El equipo de la Universidad Estatal de Ohio ha creado un prototipo utilizando un sustrato de plástico e hilo metálico (Figura 1). Los científicos informaron en una revista del IEEE de que el rango del sistema es cuatro veces mayor que el de una antena convencional llevada en el cuerpo. Su objetivo era mejorar la estabilidad de las

comunicaciones y la movilidad de los soldados. Este prototipo se ha llevado a cabo con una máquina de coser ordinaria [4].

Para asegurarse de que la señal es fuerte y la antena es multidireccional, los científicos colocan varias antenas en una pieza de ropa: en la parte delantera, en la parte trasera y en ambos hombros. Uniendo los parches mediante un cable a un controlador, situado en una pequeña caja, instalada en el cinturón.



*Figura 1: Antena textil militar fabricada por la Universidad Estatal de Ohio*

### 3. Planteamiento

#### 3.1 Bandas de frecuencia

Una banda de radiofrecuencia es un rango de frecuencias del espectro radioeléctrico utilizada en comunicaciones por radio, que son utilizadas para canales de comunicación para servicios similares con tal de evitar interferencias y permitir un uso eficiente y correcto del espectro [6]. Cada una de estas bandas tiene una asignación de frecuencias que determina cómo se utiliza y se comparte para evitar interferencias entre canales y especificar el protocolo de comunicación que permita la comunicación entre el emisor y el receptor. Uno de sus usos más comunes son los teléfonos inalámbricos domésticos, los microondas o los dispositivos Bluetooth entre otros.



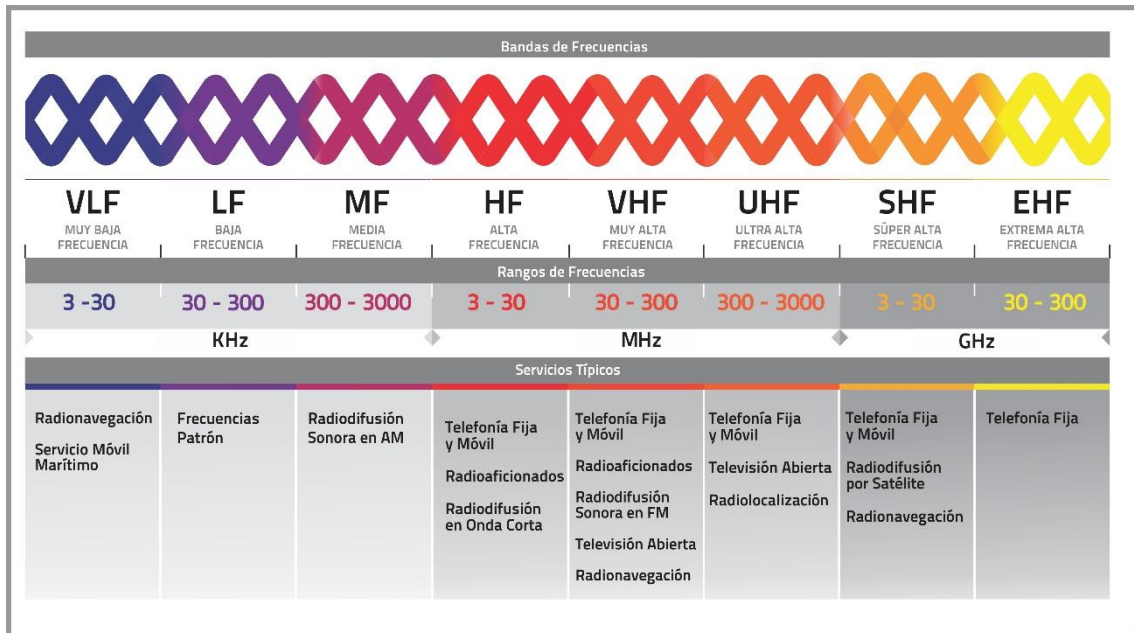


Figura 2: Rangos de frecuencia y servicios típicos para cada uno de ellos

## 3.2 ISM

Las bandas Industrial, Scientific and Medical (ISM) son bandas de radiofrecuencia electromagnética destinadas al uso en áreas de trabajo industriales, científicas y médico, para dispositivos de comunicación de campo cercano y no como uso comercial.

El uso de estos rangos de frecuencia está abierto a todo tipo de público y se caracteriza porque no hay necesidad de la petición de permisos ni licencia, siempre y cuando no se supere el límite de potencia a 3 metros, 12500uV/m (47uW).

Para poder usar estos rangos de frecuencia, la ITU requiere que los aparatos sean tolerantes a errores y utilicen ciertos mecanismos de protección para evitar interferencias y permitir un uso eficiente y correcto del espectro. Uno de sus usos más comunes son los teléfonos inalámbricos domésticos, los microondas o los dispositivos Bluetooth, entre otros.

La banda frecuencial de 868 MHz combina un gran alcance y un volumen reducido. En una antena de  $\frac{1}{4}$  de onda, en campo libre, alcanza hasta 800 metros de distancia, con la posibilidad de traspasar varios muros de hormigón y sin que esto afecte a las transmisiones. Consecuentemente, tiene un riesgo de interferencia muy reducido porque está reservada a algunas aplicaciones y la potencia de los aparatos que la utilizan es limitada.

Las frecuencias de trabajo estandarizadas son: 314 MHz en USA (potencia máxima +30 dBm), 434 MHz (+10 dBm) y 868 MHz (+14 dBm) en Europa en AM o FM.

## 3.3 Tipos de antena

Una antena es un dispositivo capaz de radiar y recibir ondas electromagnéticas hacia el espacio libre [7]. Asimismo, la antena es una estructura de transición entre el espacio libre y un conductor o guías de transmisión que se usa para transmitir energía de la fuente a la antena de forma bidireccional, es decir, su principal función es la radiación de una potencia suministrada.

Según su sistema y estructura la antena tendrá diferentes características y esto definirá el tipo de antena al que pertenece.

Tres tipos básicos de antenas: antenas planas, antenas de hilo y antenas de apertura. Las más comunes en el ámbito textil son las planas porque son integrables en las prendas de vestir y su tecnología permite que se fabriquen directamente con materiales textiles, de esta forma son flexibles y maleables, al contrario de las típicas antenas de metal que son rígidas.

Antenas de hilo: se colocan en la terminación de una línea que transporta energía de una fuente. Las dimensiones suelen ser como máximo de una longitud de onda. Se utilizan extensamente en las bandas de MF (300 kHz a 3 MHz), HF (rango de frecuencias de 3 MHz a 30 MHz), VHF (rango de frecuencias de 30 MHz a 300 MHz) y UHF (rango de frecuencias de 300 MHz a 3 GHz). Se pueden encontrar agrupaciones de antenas de hilo. Ejemplos de antenas de hilo son Figura 3:

- El monopolo vertical: aplicaciones de radio móvil en vehículos. Es la mitad de una antena dipolo situada en un plano de masa el cual actúa como reflector.
- El dipolo: recomendables para lugares pequeños, con poca ganancia. El dipolo o cable conductor en estas antenas tiene que medir la mitad de la longitud de onda de la frecuencia en la que queremos transmitir, este cable se conectará al cable coaxial que llega del transmisor. Se utilizan en comunicaciones de larga distancia (HF). Es omnidireccional, radia y recibe de la misma manera en todas direcciones horizontales. No usan la estructura del dispositivo para radiar, son independientes del resto de la integración del dispositivo [8].
- La antena Yagi: se usa para radioenlaces, son muy directivas, ya que dirigen la señal hacia un solo lugar, esto es gracias a los directores, cuantos más directores, más ganancia. Por ende, proporcionan grandes ganancias siendo muy simples y económicas. Usadas en las bandas VHF Y UHF. Normalmente se aplican para la recepción de televisión.
- La antena espira: fuertemente direccionales; la dirección privilegiada está en el plano de la espira, mientras que la recepción es mínima en la dirección perpendicular al plano de la espira.
- La antena helicoidal es un tipo especial de antena que se usa principalmente en VHF y UHF. Un conductor describe una hélice, consiguiendo así una polarización circular.

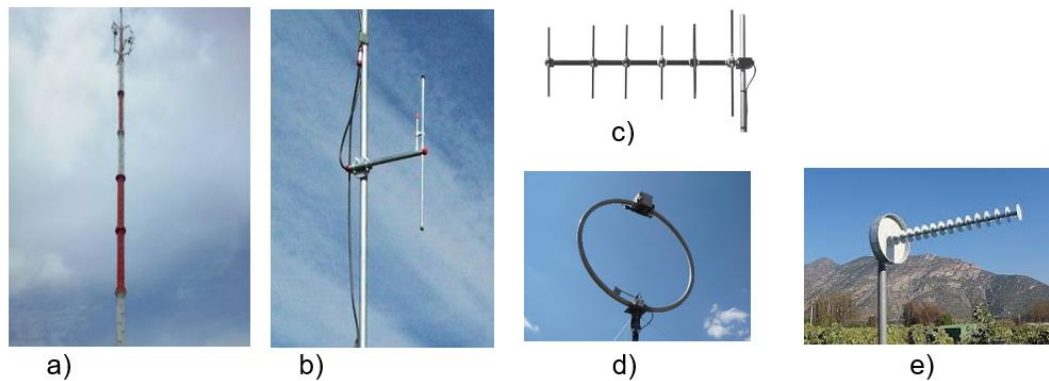


Figura 3: Tipos de antena a) Monopolo b) Dipolo c) Yagi-Uda d) Espira e) Helicoidal

Antenas de apertura: mediante superficies o aperturas direccionan el haz electromagnético, de forma que, son muy directivas. La superficie está relacionada con la ganancia y consecuentemente con la directividad, cuanto más superficie, más ganancia y más directividad. Su estructura consta de chapas metálicas cónicas con el objetivo de obtener diferentes ángulos de apertura respecto al vértice y al eje del cono, tanto en el plano vertical como en el horizontal.

- Reflectores: se caracterizan por tener elementos adicionales para modificar su direccionalidad.
  - Parabólicas: es una configuración curvada reflectora. Reciben señales de satélites, enlaces por microondas y a grandes distancias. Su plato es lo más característico de este tipo de equipo, en él se recogen las ondas que llegan y son reflejadas convergiendo todas al centro donde se encuentra el foco que recibe la suma de ellas, haciéndola muy directiva. Son las más potentes por eso son utilizadas para largas distancias.
- Lentes: formadas por una lente con el objetivo de conformar la radiación de una determinada forma y evitar que se envíe en direcciones no deseadas.

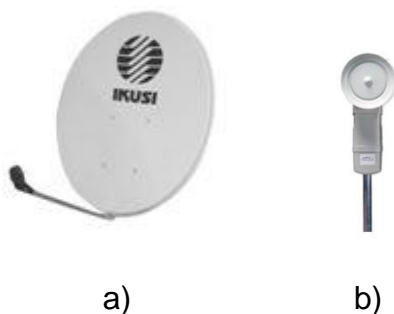


Figura 4: a) Antena Reflectora [11] b) Antena Lente

Antenas planas: agrupamiento plano de radiadores (parches) y se distribuye una señal entre ellos por un circuito. Al ser una tecnología plana, es muy fácil integrarla en los dispositivos y, consecuentemente, reduce el peso y el tamaño global. Como desventaja, presentan un estrecho ancho de banda [9].

- Antena Patch: la antena parche Microstrip es una de las antenas más conocidas, debido a todas las ventajas que ofrece, como la fácil fabricación, el bajo coste, sencillez, la adaptabilidad de curvar las superficies, etc. Consiste en un parche metálico en la parte superior de un sustrato dieléctrico con un plano de masa metálico. Tienen un patrón de radiación direccional con una importante dirección de propagación. Se utilizan en bandas UHF y tienen una eficiencia y una potencia muy bajas. Basado en este modelo se han creado diferentes tipos de antena como PIFAs y Antena de parche de micro banda (antenas patch Microstrip Wire).



*Figura 5: Antena parche Microstrip*

Array de antenas: este tipo de antenas es un arreglo geométrico compuestos de dos o más antenas. Lo que genera esto es que las señales de estas antenas se combinen para alcanzar un mejor desempeño de lo que lo haría una de estas antenas por separado. Es de gran utilidad para aumentar la ganancia y dirigir la señal hacia un solo lugar.



*Figura 6: Antena Array*

Según la tipología de la antena tiene diferentes niveles de sensibilidad dependiendo del ambiente donde este, por ejemplo, si hay otros objetos que puedan estorbar o modificar a la antena. De hecho, dependiendo de su mecanismo de radiación, pueden ser más o menos sensibles al ambiente.

En el caso de IoT, las antenas deben ser lo más pequeñas posibles para poder ponerlas dentro de dispositivos más pequeños y por simple comodidad. Es por eso, que las antenas de gran tamaño como las de media longitud de onda como las antenas dipolo son descartadas, y las de cuarto de longitud de onda o más pequeñas son mejores opciones. La desventaja de estas últimas es que necesitan y usan las otras partes metálicas, como el plano de masa, para radiar. Esto implica que toda la antena tenga que tener el tamaño del plano de masa y esto afectará a la radiación y las características de la antena.

Normalmente, cuanto pequeño sea el plano de masa menos directividad tendrá.

### 3.4 Sigfox

Propone una red independiente a la que te conectas con un chip que sea compatible con la misma. No es compatible con smartphones y tablets, pero su inclusión sería realmente sencilla ya que no tiene licencia de uso [12].

Su objetivo es obtener una red pequeña pero que pueda enviar una cantidad de datos suficiente para el IoT. De esta manera, se transmiten mensajes de 12 bytes, pudiendo enviar 140 mensajes al día. Su funcionamiento consta en enviar un paquete tres veces en tres frecuencias distintas para evitar colisiones debido a que la red no está sincronizada y que un dispositivo puede enviar un paquete en cualquier momento Figura 7. Un dispositivo Sigfox puede llegar a funcionar 20 años usando dos pilas AA, ya que el dispositivo solo se despierta cuando tiene que enviar datos y si no, se vuelve a dormir.

Una de sus grandes ventajas es ofrecer una gran eficiencia energética, alargar la vida útil y la duración de la batería de los dispositivos, ayudando al medioambiente y garantizando al cliente una larga duración del producto. Por otro lado, su uso de frecuencias libres (ISM) hace que sea resistente a interferencias. También proporciona conectividad UNB bidireccional [13]. Tiene una gestión sencilla y basada en la nube. Todos los dispositivos están conectados a la red desde un único lugar donde se utiliza una interfaz de aplicaciones web, como una web API para una sencilla gestión e integración de datos. Aparte, ofrece una cobertura internacional.

Los dispositivos más comunes que usan la red son termostatos, detectores de humo o movimiento, localizadores... que envían alertas o ubicaciones de un objeto.

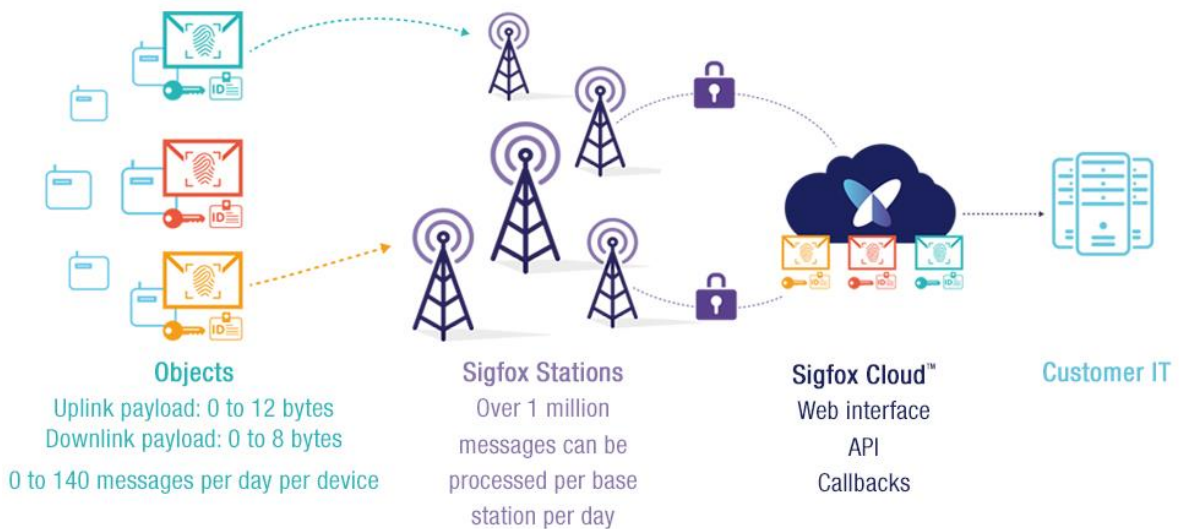


Figura 7: Esquema explicativo del funcionamiento de Sigfox

Esta red está inspirada en la comunicación de los submarinos de la II Guerra Mundial, los cuales se enviaban mensajes cortos bidireccionales a bajo coste y potencia, a largas distancias. Las frecuencias exactas utilizadas en banda ISM pueden variar de acuerdo a las regulaciones nacionales, pero, en Europa, la banda de 868 MHz es la más utilizada mientras que en EE UU es la de 915 MHz.

Se puede utilizar tanto como complemento, como de forma independiente y es tan fácil como incluir en los dispositivos pequeños, como puede ser un botón, los detectores y los chips.

En resumen, la idea de Sigfox es que los objetos puedan estar conectados a internet, poder almacenar los datos en la nube y participar en la digitalización de nuestro entorno, mediante un coste bajo y con bajas potencias para la conectividad, utilizando y desarrollando una baja banda ancha. Enviando poca cantidad de datos, usando muy poca energía y llegando a largas distancias.

### 3.5 Antenas Textiles

Las antenas textiles son uno de los componentes de las telas inteligentes y los sistemas interactivos textiles que implementan comunicación con funciones de localización, sensoriales y Wireless que se integran cómodamente y sin influir a las prendas de ropa [14].

Para asegurarse de que no va a influir en el cuerpo humano, el diseñador deberá elegir la tipología de la antena con cuidado. Por lo tanto, la antena será optimizada para garantizar que funcionará con afectos adversos como en curvas que se formen en la ropa, cambiando condiciones ambientales y lo cerca que estará del cuerpo humano y cómo este puede reaccionar.



Para hacer un uso óptimo del área consumida por la antena, la circuitería activa electrónica será integrada directamente en la alimentación de la antena mientras que el generador puede estar posicionado arriba del *patch* que radia.

El tamaño límite de los dispositivos de comunicación Wireless es marcado por el plano de tierra ya que se reduce la radiación cuando el sistema opera cerca del cuerpo humano, porque gran parte de la radiación es absorbida por los tejidos del cuerpo. Además, partes del cuerpo u objetos que podamos llevar también reducen la calidad del link Wireless, por ejemplo, una antena que busca la localización, le costará recibir datos del satélite. En particular, en frecuencias de microondas, el diseñador de la antena debe basarse en un plano de tierra largo, para evitar o reducir la pérdida de efectividad o rendimiento debido a la proximidad del cuerpo. Y también el nivel de la absorción del campo electromagnético del plano de tierra y de la tasa de absorción (SAR), dentro de los tejidos del cuerpo humano.

El hecho de que la antena forme parte de la pieza de ropa hace que se reduzca el riesgo de que se olvide del módulo electrónico o que sea quitado.

Además, las conexiones enganchadas o soldadas entre la tela y la circuitería normalmente son puntos débiles que obstaculizan la fiabilidad de la antena textil.

### 3.5.1 Materiales y técnicas de producción

Para poder juntar las partes de la antena conductivas de las no conductivas, hay 3 tipos de tecnologías de fabricación de antenas wearables disponibles. La más simple consiste en integrar, tejer, o bordar cables conductivos, cinta de cobre o hilos conductivos en una pieza de ropa. Normalmente, se aplica para construir antenas con tipologías sin plano de tierra. Otra técnica popular es adjuntar e-textiles, los cuales son telas de cobre o plata-níquel-cobre sin tejidos. Esta técnica es utilizada para las tipologías como microstrip o con capas múltiples, para garantizar el correcto alineamiento de todas las capas. Por ejemplo, en la Figura 8 aparece una antena patch Microstrip, implementada por el patrón de Zelt electro-textile, para antena patch y plano de masa, en un sustrato de lana [14].



*Figura 8 Antena Microstrip cosida en el sustrato de una bata*

Finalmente, las técnicas añadidas, como pantalla o impresora, se pueden aplicar para el patrón de la antena, reflector, y el plano de masa en el tejido.

Recientemente, la tecnología de sustrato de guía de ondas, una técnica establecida para crear estructuras de guías de onda en láminas de alta frecuencia (multicapa), ha sido aplicada a sustratos textiles. La técnica ofrece perspectivas del diseño de amplios rangos de circuitos de microondas textiles, incluyendo antenas textiles con un perfecto aislamiento de la radiación de la antena respecto al cuerpo humano.

### 3.5.2 Topologías de antenas

Lo primero que hay que valorar para diseñar una antena, correcta y eficazmente, es hacer una antena que pueda ser llevada y que cumpla los requerimientos eléctricos y mecánicos, hacerla con unas características estables y con una máxima radiación y, además, que el efecto de proximidad del cuerpo humano sea el mínimo [15]. A parte de eso, los movimientos y el equipamiento del cuerpo pueden influir en la reactividad del campo y se deberá intentar que varíe lo menos posible. En general, son preferidas las antenas de tipología con el plano de masa grande, ya que no radian directamente al cuerpo humano, además que actúa como una protección electromagnética que reduce la absorción del campo electromagnético en los tejidos del cuerpo. Por desgracia, el plano de masa es solo práctico en el rango de frecuencias de microondas. A frecuencias más bajas, el tamaño del plano de masa sería muy largo para integrarlo dentro de prendas. Sin embargo, para obtener suficiente ancho de banda en radiación y en su eficiencia, se requiere de un espacio suficiente entre el plano de masa y la estructura de la antena. Para la práctica y cómoda integración dentro de la prenda, el tamaño de la antena no será más grande de 10cm y su altura será de unos pocos centímetros. Si esto no se cumple, se deberá valorar el efecto que producirá el cuerpo humano a la antena y viceversa, a la hora del diseño de la antena. De todas formas, la reducción de la antena es limitada para garantizar la suficiente ganancia de la antena. Después, se deberá comprobar que la radiación continúe siendo satisfactoria, aunque cambie el tejido, como por ejemplo que se doble o arrugue, para diferentes posturas y en condiciones de operación variables.

Los dipolos o las antenas *loop*, integradas invisiblemente en las prendas, pueden aplicarse para reemplazar antenas de látigo (propias de las antenas de coche) que sobresalen. Los dipolos pueden doblarse, curvarse y reducen el tamaño de la antena para aquellos con menos de media longitud de onda.

## 3.6 Parámetros de las antenas

Cada tipo de antena se caracteriza según los valores de los parámetros que tenga. Estos parámetros están relacionados con la radiación de la antena y marcarán su comportamiento.



### 3.6.1 Impedancia

Es la relación entre voltaje y corriente en la entrada de la antena. Consta de la parte real que representa la potencia irradiada o absorbida por la antena, la denominada resistencia y una parte imaginaria que almacena energía en el campo cercano, la denominada reactancia. Cuando se anula su reactancia de entrada, las antenas se denominan resonantes. Las dos partes dependen de la frecuencia o de objetos cercanos [16].

$$Z_A = R_A + jX_A$$

*Ecuación 1*

Es necesario que tanto el transmisor como el receptor estén adaptados, es decir, que tengan la misma impedancia de entrada. De esta manera no habrá pérdidas y la antena receptora radiará a la máxima potencia.

Comúnmente, las antenas de telecomunicación tienen una impedancia de 50 ohmios mientras que las destinadas al uso de la televisión tienen una impedancia de 75 ohmios.

### 3.6.2 Ancho de banda

Se refiere al rango de frecuencias en el que puede operar correctamente la antena. Esta debe cumplir una serie de requisitos: presentar una ganancia dentro de los 3dB de ganancia máxima o un VSWR con un valor menor a 1.5. El VSWR es la medida que describe numéricamente como de adaptada está la impedancia al radio o la transmisión lineal que está conectada, también describe la potencia reflectada por la antena [17].

El ancho de banda también puede ser descrito en términos de porcentaje de la frecuencia central de la banda:

$$Bandwidth\% = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_{center}} \cdot 100$$

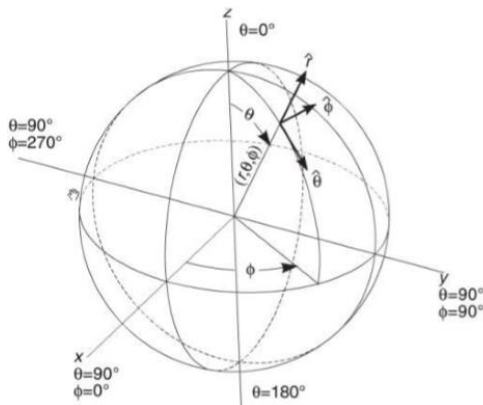
*Ecuación 2*

*Figura 9: Fórmula del ancho de banda*

Donde  $F_{max}$  es la frecuencia más alta en la banda,  $F_{min}$  es la frecuencia más baja, y  $F_{center}$  es la frecuencia central.

### 3.6.3 Patrón de radiación

Representación gráfica de las intensidades de campo eléctrico o densidad de potencia en diferentes posiciones angulares, muestra el comportamiento de la antena. Con esta representación podemos definir el tipo de antena y la directividad [18].



*Figura 10: Sistema de coordenadas esféricas*

Estableciendo un sistema de coordenadas esféricas, donde  $\theta$  i  $\Phi$  son los ángulos para especificar una dirección, obtenemos un marco de referencia donde situar la antena a caracterizar, que será en el origen, manteniendo la distancia, se representa el campo eléctrico en función del ángulo.

Se pueden considerar diferentes casos en el estudio del diagrama de radiación:

Patrón isotrópico: antena ideal, sin pérdidas e irradia energía en todas direcciones.

Patrón direccional: irradia en una dirección concreta o específica.

Patrón omnidireccional: irradia en todas las direcciones.

Patrón bidireccional: irradia en dos direcciones.

Se puede representar tanto tridimensional como bidimensionalmente, manteniendo en este caso las variables  $\theta$  i  $\Phi$  constantes, como se puede observar en la Figura 11.

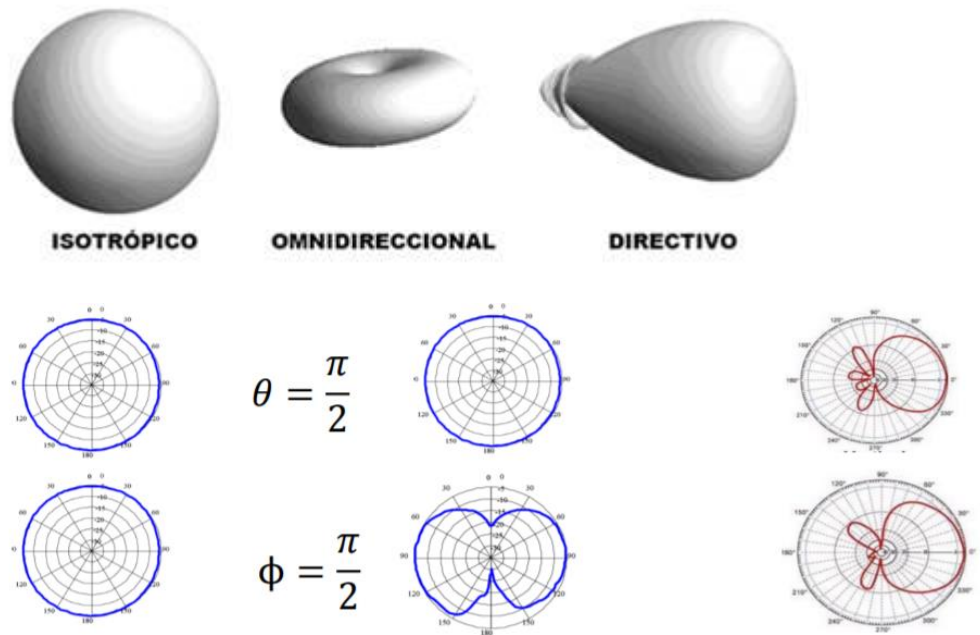


Figura 11: Tipos de patrones de radiación

Dentro de los diagramas de radiación podemos definir diagrama copolar aquel que representa la radiación de la antena con la polaridad deseada y contrapolar al diagrama de radiación con polaridad contraria a la que ya tiene.

En el diagrama se distinguen las formas de los lóbulos de radiación. Los lóbulos se clasifican en principales (máxima radiación) y secundarios (máximos relativos), y estos últimos en laterales y posteriores, estos radian potencias indeseadas que pueden llegar a producir interferencias. El HPBW es el ancho de haz, es el intervalo angular en el que la densidad de potencia radiada es igual a la mitad de la potencia máxima (en la dirección principal de radiación) Figura 12 [18].

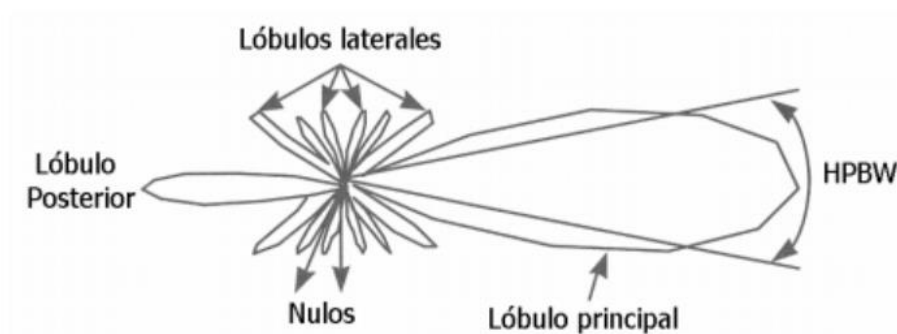


Figura 12: Distribución de los lóbulos en un diagrama de radiación

Ancho de haz entre ceros (FNBW): es el ancho del lóbulo principal completo, es decir, la separación angular en las direcciones del espacio donde el lóbulo principal toma un valor nulo.

Relación delante-atrás: Relación entre el lóbulo principal y el lóbulo posterior, que causa interferencias en radioenlaces. Es decir, entre la máxima potencia radiada y la potencia radiada en dirección opuesta. Este parámetro es especialmente útil cuando la interferencia hacia atrás es crítica en la elección de la antena que vamos a utilizar, no se suele tener en cuenta porque no ocurre habitualmente.

### 3.6.4 Polarización

Se define la polarización de los campos magnético y eléctrico en una determinada dirección. Tiene en cuenta la propagación de las ondas por lo que puede ser: lineal, circular o elíptica.

En la lineal, las variaciones del campo eléctrico se hacen en una sola dirección, en la circular toman una trayectoria circular y en la elíptica describen una trayectoria elíptica.

Para determinar la polarización se deben tomar las medidas a una larga distancia para visualizar que no cambie según la lejanía. Por otro lado, la transmisión y la recepción dependerán del tipo de polarización, por lo tanto, la antena recibirá un tipo de ondas específico según su condición, por lo contrario, habrá pérdidas de potencia y de información.

### 3.6.5 Directividad

Es la relación entre la intensidad de la radiación de una antena en una dirección concreta y la intensidad de la radiación de la antena en todas las direcciones. Se caracteriza por ser la zona del diagrama de radiación donde se concentra la mayor intensidad de la potencia si no se especifica la dirección angular. Toma en consideración las propiedades direccionales de la antena.

### 3.6.6 Ganancia

Se define como la relación entre la intensidad de radiación en cualquier dirección a la radiación de intensidad que se obtiene al recibir potencia a la entrada y radiarla de manera isotrópica en las mismas condiciones. Es la característica más importante ya que es la amplificación de la señal. Cuanto mayor es la ganancia, mejor es la antena. A diferencia de la directividad, la ganancia sí que tiene en cuenta las pérdidas ya que se relaciona con la eficiencia. Por lo tanto, a más ganancia, mejor antena.

Hay dos tipos de ganancia:

·Ganancia total: eficiencia total de la antena. Es la suma de la eficiencia total y la directividad.

·Ganancia IEEE: eficiencia de radiación de la antena. Es la cantidad de potencia que la antena medida necesitaría para irradiar con la misma cantidad de potencia que una antena isotrópica. Es la suma de la eficiencia de radiación y la directividad.

### 3.6.7 Eficiencia

Relación entre la potencia radiada y la entregada por la antena. También se puede definir como la relación entre ganancia y directividad. Siempre se busca la mayor eficiencia posible, por lo tanto, se busca un acoplamiento óptimo entre las impedancias de las diferentes partes de la antena. De lo contrario, se podrían formar distorsiones en la señal. Si la ganancia y la directividad son iguales significará que no tenemos pérdidas y que tendremos una máxima efectividad.

### 3.6.8 Parámetros de dispersión

En altas frecuencias no se puede obtener correctamente la tensión y la corriente, es por eso que se utilizan los parámetros de dispersión o parámetros S, ya que se le da más importancia a la línea de transmisión y de la potencia. Con estos parámetros podremos relacionar los conceptos de potencias incidentes y reflejadas, para todos los puertos.

Cada uno de esos parámetros S tiene su propia definición en la red bipuerto (Figura 13).

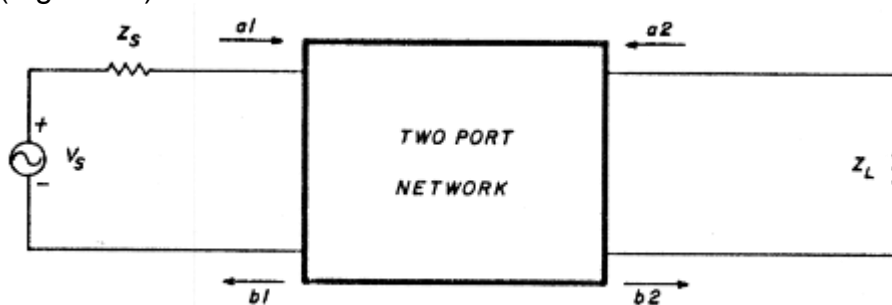


Figura 13: Modelo del parámetro-S

**S<sub>11</sub>** es el **coeficiente de reflexión a la entrada**, con la salida terminada en carga adaptada, es decir,  $Z_L = Z_0$  (la impedancia de carga es igual a la impedancia característica de la línea). Si la carga no está adaptada, la definición del coeficiente de reflexión a la salida es la siguiente:

$$\Gamma_L = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

Ecuación 3

$$\Gamma_{in} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_L}{1 - S_{22}\Gamma_L}$$

Ecuación 4

Con  $\Gamma_{in}$  como el coeficiente de reflexión a la entrada y  $\Gamma_L$  como el coeficiente de reflexión de la carga.

**S<sub>22</sub>** es el **coeficiente de reflexión a la salida** con la entrada terminada en carga adaptada, es decir,  $Z_S = Z_0$  (la impedancia de fuente es igual a la impedancia característica de la línea). Si la carga no está adaptada, la definición del coeficiente de reflexión a la entrada es la siguiente:

$$\Gamma_S = \frac{Z_S - Z_0}{Z_S + Z_0}$$

Ecuación 5

$$\Gamma_{out} = S_{22} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_S}{1 - S_{11}\Gamma_S}$$

Ecuación 6

Con  $\Gamma_{out}$  como el coeficiente de reflexión a la salida y  $\Gamma_S$  como el coeficiente de reflexión de la fuente.

**S<sub>12</sub>** es la **ganancia de transmisión inversa**, con la entrada terminada en carga adaptada. Indica la amplificación de la red en sentido inverso (de la salida a la entrada).

**S<sub>21</sub>** es la **ganancia de transmisión directa**, con la salida terminada en carga adaptada. Indica la amplificación de la red en sentido directo (de la entrada a la salida).

## 3.7 SAR

Es la tasa de absorción específica (specific absorption rate), y se define como la potencia máxima con que un campo electromagnético de radiofrecuencia es absorbido por el tejido del cuerpo humano, sobre 1 o 10 gramos. También se refiere a la absorción de otras formas de energía por el tejido, incluyendo ultrasonido. Se emplea para frecuencias entre 100 kHz y 100 GHz, en particular para teléfonos móviles y resonancia magnética. Involucra los parámetros de la energía, la conductividad eléctrica y la densidad de masa, con una unidad final de W/kg [20].

$$SAR = \int \frac{\sigma(r)|E(r)|^2}{\rho(r)} dr$$

Ecuación 7

Esta medida sirve para definir si un dispositivo estará dentro del reglamento según los diferentes países que definen diferentes tasas máximas, con el fin de que el elemento que se quiera comercializar, no perjudique al ser humano a causa de su radiación.

El resultado del SAR variará en torno a la ubicación del cuerpo donde se exponga el campo, como la forma y la geometría de la fuente de radiofrecuencia. Por tanto, es necesario hacer pruebas con cada fuente específica y en la posición de uso más habitual, para comprobar que no se corren riesgos y puede ser perjudicial para el ser humano. Para que el dispositivo sea completamente seguro, se elige el máximo nivel medio en la parte del cuerpo estudiada, con tal de elegir el valor más restrictivo y ver que está completamente por debajo del límite establecido. Por ejemplo, para el caso de un teléfono móvil, elegiremos el valor más alto que nos resulte el SAR en la posición de la cabeza, ya que es el sitio más habitual donde colocamos el teléfono en caso de llamadas. Otros casos podrían ser equipos de manos libres o teléfonos inalámbricos de línea fija, todos son dispositivos de radiofrecuencia.

Como se ha comentado anteriormente, algunos gobiernos, basándose en el principio de precaución, han definido límites de seguridad para la exposición máxima a la energía de radiofrecuencia procedente de teléfonos móviles. En los Estados Unidos de América, la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) exige que los teléfonos presenten un valor de SAR igual o inferior a 1,6 vatios por Kilogramo (W/kg) medidos en un volumen de 1 gramo de tejido.

La Unión Europea fija como límite 2 W/kg, promediados en 10 gramos de tejido.

Como límite de exposición para el cuerpo entero, se ha fijado un tope de 0,08 W/kg promediado en toda la masa corporal.

La regulación para la medida del valor SAR y sus máximos admisibles es establecida por la ANSI, IEEE y la ICNIRP.

Según CST basándose en un estudio de University of L'Aquila y University Campus-Biomedico, cuánto más tiempo se mantenga en un tejido, este irá subiendo la temperatura.

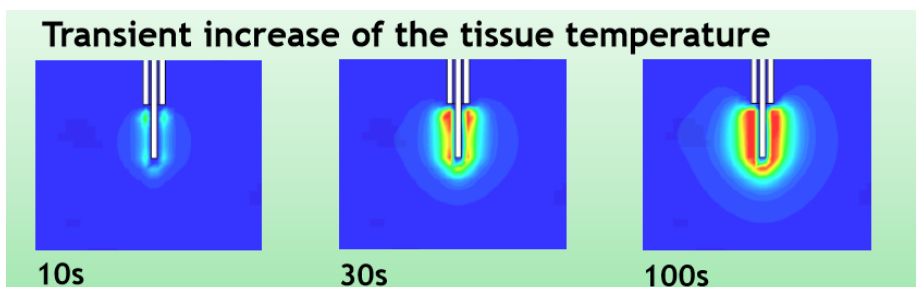


Figura 14: Proceso del tejido según el incremento de temperatura

## 3.8 Materiales

### 3.8.1 Tejano

El tejano o denim (Figura 15) es una tela de algodón asargado de trama blanca teñida de azul índigo. Es una tela pesada y durable que absorbe la transpiración y la humedad fácilmente. En la siguiente tabla se observan las propiedades a tener en cuenta en el diseño de la antena.

Espesor	1mm
Er	1.7
Pérdida en tangente	0.0025

*Tabla 1: Características del tejido del tejano*



*Figura 15: Tejano utilizado como sustrato*

### 3.8.2 Hilo de Plata

Hilo conductor de Plata (Figura 16), su propósito principal: aplicaciones para eliminar o inhibir el crecimiento de microorganismos, tales como bacterias, hongos o parásitos para prendas de vestir, textiles inteligentes e hilo de coser [21].

- Descripción: 99% hilo de Nylon plateado puro 140/17 dtex
- Resistencia:  $<30\Omega$  / cm
- Rendimiento: 35,000 M / Kg.
- Tenacidad: Promedio 70 cN / tex.
- Alargamiento: abt. 40%
- Punto de fusión (F): 492





*Figura 16: Ovillo del hilo de plata*

## 3.9 Software

### 3.9.1 CST Studio Suite

Es un software de análisis de sistemas electromagnéticos en 3D de alto rendimiento para diseñar, analizar y optimizar componentes y sistemas electromagnéticos [22].

Permite realizar simulaciones y análisis de sistemas completos compuestos de diferentes componentes complejas de manera eficaz y directa. Los temas comunes del análisis de EM incluyen el rendimiento, la eficiencia y el rendimiento instalado de las antenas y los filtros, la compatibilidad electromagnética y la interferencia (EMC / EMI), la exposición del cuerpo humano a los campos, los efectos electromecánicos y los efectos térmicos en niveles elevados.

Este software es utilizado tanto en uso personal como en principales empresas de tecnología e ingeniería de importancia internacional, una de las ventajas es que ofrece muchos beneficios a nivel de producto de mercado, proporcionando ciclos de desarrollo sencillos y cortos, también reduce la cantidad de prototipos físicos necesarios, por lo tanto, optimiza el proceso y el rendimiento del dispositivo de manera virtual, lo que hará que a la hora de llevarse a cabo sea mejor que la idea principal.

CST Studio ofrece diversos tipos de estudios: CST MWS, CST DS, CST EMS, CST PS, CST MPS, CST PCBS y CST CS.

### 3.9.2 CST MW Studio

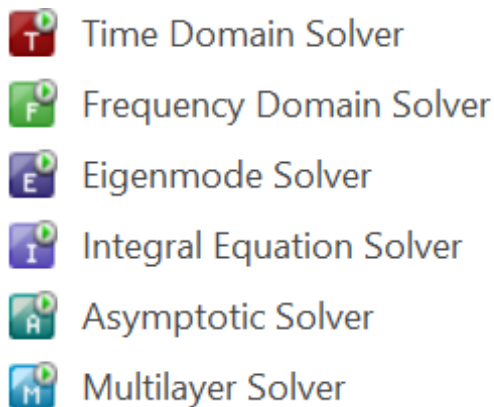
CST MICROWAVE STUDIO® (CST® MWS®) es una herramienta especializada para la simulación 3D de componentes de alta frecuencia [23].

Este software permite el análisis rápido y preciso de dispositivos de alta frecuencia (HF) tales como antenas, filtros, acopladores, estructuras planas y multicapa y efectos.

CST MWS ofrece módulos adicionales para aplicaciones específicas. Además, CST MWS puede integrarse en varios flujos de trabajo estándar de la industria a través de la interfaz de usuario de CST STUDIO SUITE®.

CST MICROWAVE STUDIO® es visto por un número creciente de ingenieros como una herramienta de desarrollo estándar de la industria.

CST® dispone de múltiples módulos de cálculo apreciados en la Figura 17.



*Figura 17: módulos de cálculo del CST Studio Suite*

Para llevar a cabo la simulación en este proyecto se ha usado el Transient solver.

El Transient solver es un simulador de propósito general que ofrece simulaciones a tiempo real en el dominio de tiempo. Es útil para estudiar el campo de propagación a través de uno o varios componentes.

Además, permite simulaciones de Broadband, en varias frecuencias, con una muy buena resolución en frecuencia.

### 3.9.3 Gerbview

El programa GerbView es un visor de diagramas de diseño asistido por ordenador con una serie de funciones especiales de impresión y navegación [24].

Convierte diferentes tipos de formatos de archivos, con tal de establecer los mismos parámetros, medidas y resolución de manera simple, compacta e inequívoca.

Dando resultados de gran precisión. Esto nos permitirá pasar los archivos de CST Studio a el programa Digitizer Ex, así podremos trabajar con precisión y

los datos reales del diseño de nuestra antena para bordarlos sobre el sustrato del tejano.

GerbView soporta los siguientes formatos: Gerber, Excellon, HPGL, HP RTL, TIFF, JPG, PNG, CALS, BMP, DXF, DWF, PS, CGM, WMF, SVG, GL2, HP, PRN

### 3.9.4 Digitizer EX

El software Digitizer EX es la primera versión compatible con las máquinas de bordado. Este software permite la comunicación de nuestro diseño digitalizado con la máquina y le dará las órdenes para poderlo confeccionar.

Ofrece la posibilidad de conectarse de diferentes maneras a la máquina, en nuestro caso, existe la posibilidad de conectarse directamente con el PC y enviar el diseño que posteriormente se querrá bordar. Este software nos permitirá configurar los parámetros para que el resultado sea óptimo. Como el color o modificar el bordado, pudiendo representar fotos, texturas, patrones de letras, diseños personalizados, etc. El programa por defecto nos guardará el archivo en formato JAN, este formato será compatible con la máquina de bordado.

## 3.10 Maquinaria

Con el fin de confeccionar la antena se han utilizado diferentes máquinas, tanto de fabricación como de medición, para llevarla a cabo y tener unos resultados eficaces. Para poder obtener una medición precisa de las características y parámetros de la antena, se requiere de instrumentos e instalaciones caros. Para ello se utiliza una cámara anecoica y así evitar falsas lecturas en las reflexiones, y un analizador previamente calibrado.

### 3.10.1 Singer Futura XL-550

Máquina de coser y bordar programable (Figura 18Figura 1), totalmente editable gracias a la conexión USB para conectar la máquina al ordenador.

Una de sus características a destacar es que proporciona un gran espacio para poder bordar con diferentes tamaños de hojas de enganche y programación de la aguja. Además, permite realizar hasta 217 programas de punzadas y 13 posiciones de aguja [25].

Así, con esta máquina y a través del ordenador, se pueden configurar libremente los parámetros de bordado tales como espaciado de puntada,

longitud de puntada, densidad de bordado, velocidad, tensión, refuerzos y bordes emplumados.



Figura 18: Máquina de coser, Singer Futura XL-550

### 3.10.2 RF Diagnostic Chamber ROHDE & SCHWARZ

Una cámara anecoica es una cámara que se encuentra aislada del exterior de cualquier fuente de ruido o influencia sonora externa, diseñada para absorber en su totalidad las reflexiones producidas por ondas acústicas o electromagnéticas en cualquiera de sus superficies como techo, suelo o paredes laterales [26].

El rango de frecuencias de la cámara suele ir aproximadamente de los 400 Hz a los 18 kHz con una absorción superior al 95%. Existen dificultades en las frecuencias bajas debido a la gran absorción y las dimensiones de la cámara, en este caso este factor no nos afectará porque la antena trabaja a frecuencias superiores.

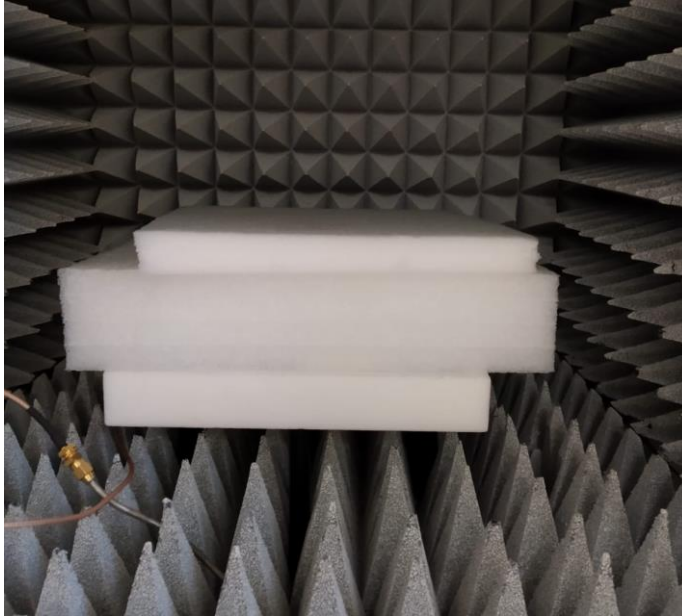
Constan de unas paredes recubiertas con cuñas en forma de pirámide con la base apoyada sobre la pared, en este caso en la parte inferior, construidas con materiales que absorben el sonido y aumentan la dispersión o difusión del escaso sonido que no es absorbido. Algunos ejemplos de estos materiales son la fibra de vidrio o ciertas espumas, como es el caso (Figura 19). Respecto la parte exterior, es un recinto blindado metálico emulando una jaula de Faraday.

Estas cámaras tienen múltiples aplicaciones en el ámbito de las telecomunicaciones, como la medida del SAR en los terminales móviles, o el diseño y caracterización de elementos radiantes tales como antenas y dipolo.

En esta cámara, cabe destacar su tamaño y el fácil uso a la hora de medir autointerferencia o las emisiones radiadas, realizar pruebas de coexistencia y

verificar el patrón de radiación de la antena durante el desarrollo. Es muy útil para la fase de desarrollo del producto y su diseño. El resultado es instantáneo y los diseñadores no tendrán que esperar unos tiempos de prueba como ocurre con otras cámaras más grandes.

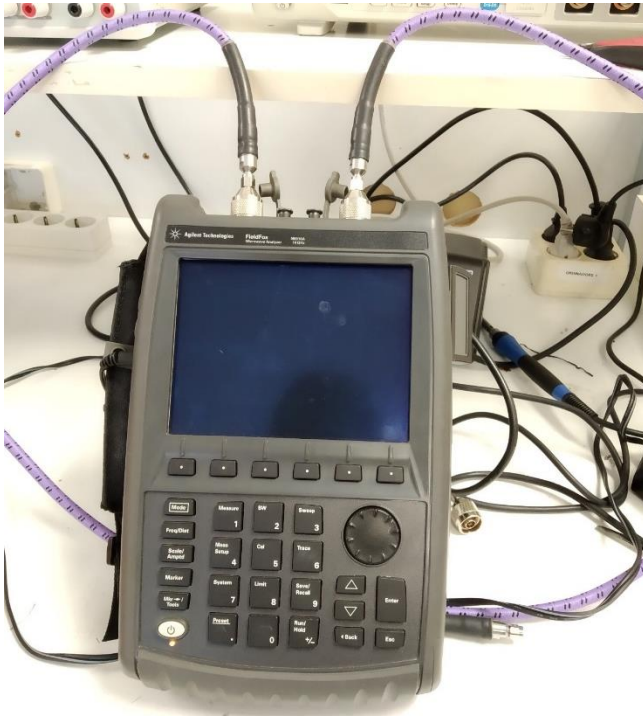
La eficacia de blindaje de la cámara supera los 110 dB, permitiendo pruebas de sensibilidad en receptores GPS con niveles de entrada inferiores a -160 dBm [27].



*Figura 19 Cámara anecoica RF Diagnostic Chamber ROHDE & SCHWARZ vista desde el interior*

### 3.10.3 Fieldfox N9916A Microwave analyzer

Analizador portátil con varias funciones. El equipo realiza funciones como analizador de antenas, de redes vectoriales y de espectros de radiofrecuencia en un ancho de banda comprendido entre 30 kHz y 14 GHz, la impedancia de entrada es de  $50 \Omega$  (nominal). Las principales funcionalidades son el analizador de cables, antenas y de red vectorial, analizador de espectro entre otros. Mide simultáneamente los 4 parámetros S. Se pueden realizar mediciones precisas del analizador de espectro ( $\pm 0.5$  dB) sin necesidad de calentamiento previo. Tiene una salida USB para exportar los resultados de las gráficas en diferentes formatos [28].



*Figura 20: Fieldfox N9916A Microwave analyzer*

### 3.10.4 Agilent Technologies CalKit 85521A

Con un kit de calibración para calibrar el analizador Fieldfox N9916A Microwave analyzer, en circuito abierto, cerrado y de carga. Con impedancia de entrada 50  $\Omega$ .



*Figura 21: Agilent Technologies CalKit 85521A*

### 3.10.5 TENMA 72-7730A - Multímetro Digital

Es un multímetro, también denominado como polímetro o tester, es un instrumento eléctrico portátil para medir directamente magnitudes eléctricas



activas, para corriente continua o alterna, el modelo TENMA 72-7730A es digital.

El multímetro tiene diferentes funciones de medición, como son Intensidad, Tensión, Capacidad, Frecuencia, Resistencia y Temperatura.

En este proyecto se utilizará para medir la continuidad de la antena.



Figura 22: Tenma 72-7730A

## 4. Metodología

Para el diseño de la antena se ha utilizado el Software CST Studio Suite 2017, donde aparte del diseño calcula los parámetros esenciales de la antena como es el campo eléctrico, el parámetro S11, la eficiencia, la directividad, la ganancia, el SAR, etc. Se consideró un modelo de base para modificarlo y obtener una antena parecida, al menos en características, a una de tipo patch o microstrip, pues son las más utilizadas en el mundo de las antenas textiles ya que son sencillas y económicas de hacer. Concretamente, en este proyecto el objetivo era poder hacer una antena tipo IFA y MIFA lo más pequeña posible, este tipo de antenas se basa en la configuración de las microstrip de líneas de transmisión.

### 4.1 IFA

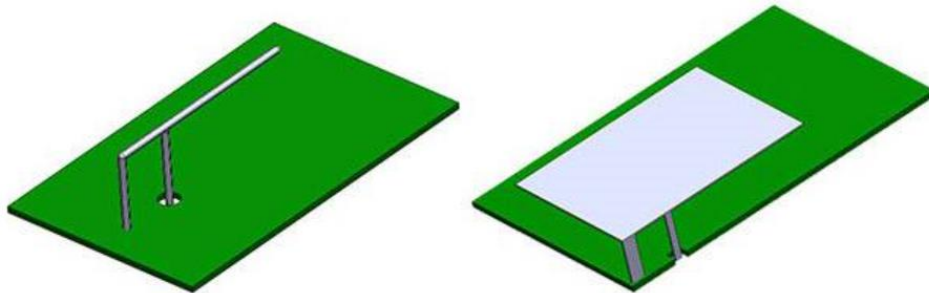
La Antena IFA es la antena F invertida, consiste en un elemento plano rectangular situado por encima de un plano de masa con una longitud normalmente de un cuarto de longitud de onda, una placa o pasador de

cortocircuito y un mecanismo de alimentación para el elemento plano. Está conectada a tierra por uno de los extremos. Es una variante del monopolo donde la sección superior ha sido plegada de manera paralela al plano de masa. Esto se hace para reducir la altura de la antena, manteniendo una longitud de onda resonante.

Es una antena de tamaño reducido, compacta, fácil de fabricar y con bajo coste de fabricación, respecto al monopolo se puede controlar más la impedancia de adaptación. Se utiliza en aplicaciones portables como teléfonos móviles, ordenadores, tablets, etc. En transmisiones típicas de GSM, GPS, Wi-fi y Bluetooth.

## 4.2 PIFA

La antena planar en forma de F invertida es un tipo de antena en forma de F invertida que tiene una placa superior en lugar de un solo cable.



*Figura 23: Antena IFA (izquierda), Antena PIFA (derecha)*

Su característica principal es que se puede ampliar su ancho de banda. Además, el uso de estas técnicas permite cambiar el tamaño de la placa superior, lo que se traduce en antenas más pequeñas que requieren menos espacio en placa [29].

La estructura de PIFA es simple y se puede ocultar fácilmente en los teléfonos cuando se compara con otras antenas convencionales. Puede estar configurada en diferentes bandas frecuenciales, pudiendo ser de una banda, multi banda o reconfigurable.

Esta antena tiene un patrón omnidireccional y proporciona una alta ganancia en dirección vertical y horizontal. Por lo que las hace muy estables y se utiliza tanto en aplicaciones fijas como móviles ofreciendo mucha flexibilidad.

## 4.3 MIFA

La antena MIFA se utiliza con frecuencia en muchos tipos de comunicación inalámbrica, es básicamente una progresión de la antena IFA estándar, con el fin de ahorrar espacio, pero manteniendo el rendimiento doblando el brazo transmisor. Cuando se necesita una antena mucho más pequeña lo que se



hace es serpentear la parte superior para reducir la altura, manteniendo su longitud eléctrica diseñada (Figura 24). Su uso más común es un tipo de antena de teléfono, con la misma estructura de una antena microstrip pero en cortocircuito a tierra. De esta manera, produce una longitud de un cuarto de onda [30].

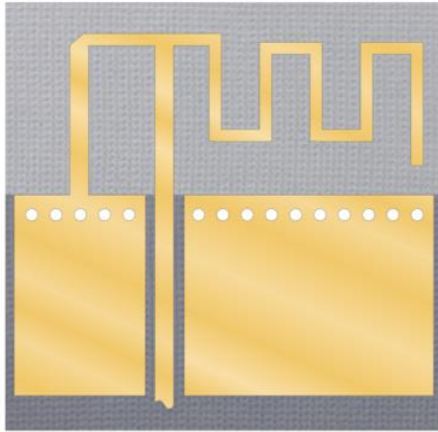


Figura 24: Estructura de una antena tipo MIFA [31]

## 4.4 Materiales utilizados

Los materiales que se han usado para la realización del estudio teórico y la confección del práctico son los siguientes:

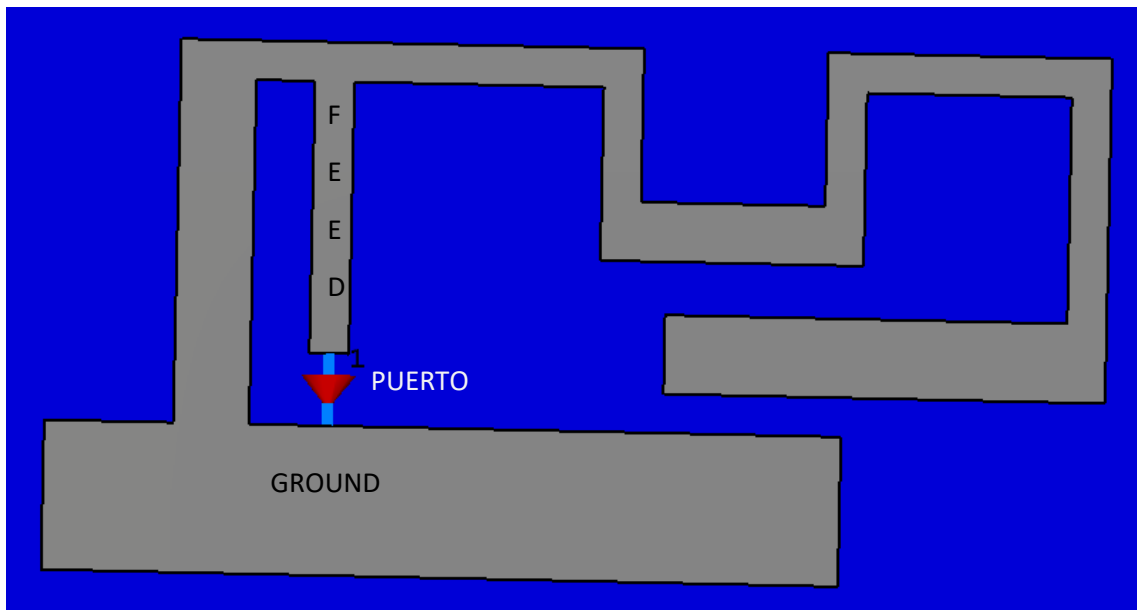
- Respecto al sustrato, se ha elegido el tejano ya que sus propiedades son favorables para la conducción y pensando en el ámbito comercial, podría ser un tejido que independientemente en chaquetas, bolsos, pantalones o complementos, es común, internacionalmente y lo llevan personas de cualquier género y edad.
- Para la antena, en el ámbito práctico se ha utilizado hilo de plata y en la simulación y diseño se ha utilizado el material PEC, que representa un material metálico e ideal.

## 4.5 Modelaje de la antena

Después de varias pruebas para familiarizarse con el software e ir probando diferentes antenas con distintas formas y tipos, se ha partido de la base de una antena MIFA hecha por Maite Navas en su trabajo de final de grado [32] y se ha ido reduciendo los tamaños y deformando la antena, obteniendo varias antenas válidas para todos los requisitos del diseño, escogiendo las dos antenas con las que se obtenían los mejores resultados respecto el parámetro S11, la ganancia, la directividad y la eficiencia que se mostraran en las siguientes tablas e ilustraciones.

Finalmente, se han elegido dos antenas que las nombraremos en todo el trabajo como Prueba4 y Prueba3, estas dos antenas, como se ha comentado anteriormente, son antenas MIFA, resultados de modificaciones de la antena que se ha cogido de base. La principal diferencia es el tamaño y la forma y esto hará que tengan unas características distintas. Sus resultados de las simulaciones se mostrarán en los siguientes apartados.

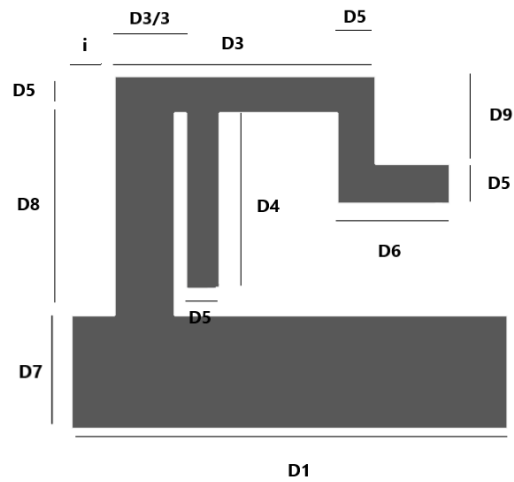
La antena está compuesta por el feed o alimentación que proporciona corriente a la antena, el ground o masa que forma parte de la propia antena y son unidos por el puerto. El puerto discreto de la antena tiene una impedancia de 50 Ohms.



*Figura 25: Esquema de la antena Prueba3*

Para llegar a las medidas definitivas de la antena se han ido variando todas las medidas, es decir, reduciendo y aumentando la longitud y grosor de cada parte de la antena para obtener los resultados más óptimos. En cada resultado se ha observado la evolución del parámetro S11, el que nos definirá a qué frecuencia obtenemos menos decibelios y esta frecuencia deberá ser la anteriormente mencionada, 868MHz, para poder utilizar la red Sigfox. En el parámetro S11, también deberemos tener en cuenta que el coeficiente de reflexión siempre esté por debajo de -10 dB.

## Prueba4



*Figura 26: Plano de la estructura de la antena Prueba4*

Prueba4	mm
D1	80
D3	49
D4	39.91
D5	6.1
D6	10.8
D7	24
D8	48.35
D9	28
i	8

*Tabla 2: Medidas de los parámetros de la antena Prueba4*

## Prueba4

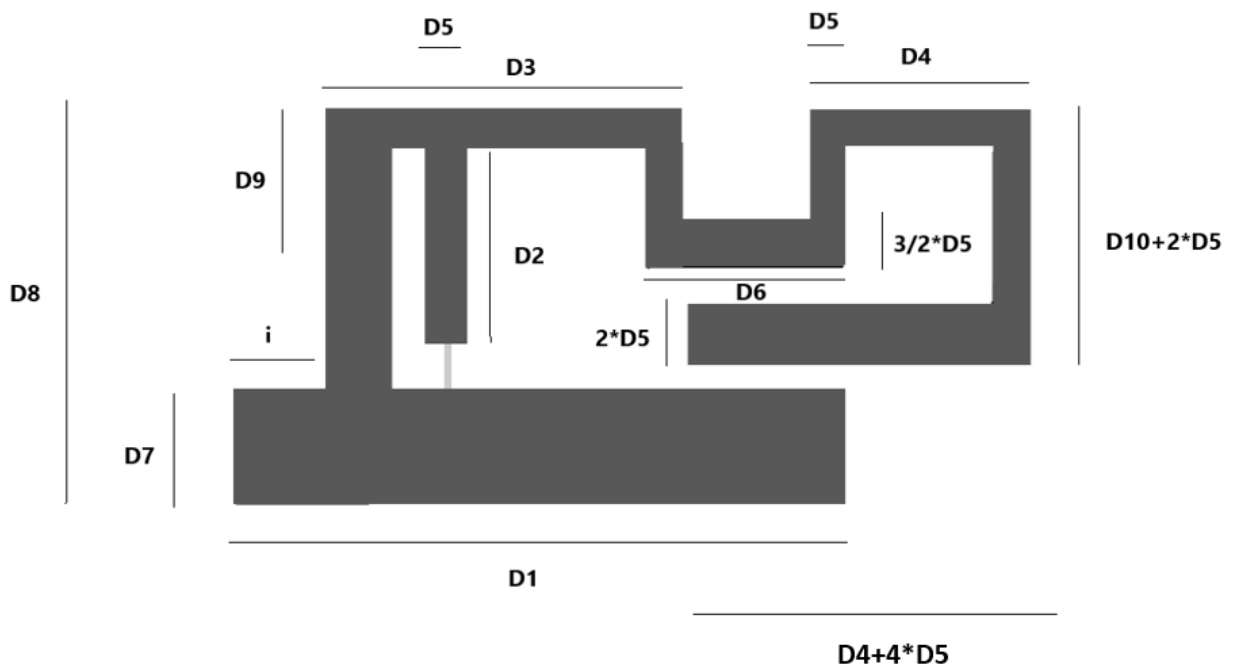


Figura 27: Plano de la estructura Prueba4

Prueba 3 mm	
D1	105
D2	41.03
D3	61
D4	37.4
D5	5.2
D6	34.7
D7	19.71
D8	45.35
D9	28
D10	35
i	17

Tabla 3: medidas de los parámetros Prueba3

## 4.6 Resultados de la simulación

En este apartado se mostrarán los resultados compilados por el software CST Studio Suite de las dos antenas diseñadas teniendo en cuenta que la antena está integrada en un tejano, ya que este material afecta a su composición y resultados de radiación. La idea es comparar los resultados de las antenas y al final quedarse con la que mejores resultados proporcione para el diseño final. El tejano puesto en la simulación tiene unas dimensiones de  $W \times L \times h$ , siendo  $W=290\text{mm}$ ,  $L=85\text{mm}$  y  $h=1\text{mm}$ , en los componentes en el software CST se puede distinguir porque es de un color azul oscuro y el material asignado es el tejano con una  $\epsilon$  de 1.7 y una  $\mu$  de 1, con una pérdida en tangente de 0.0025. Para la antena se le ha asignado un material PEC y un grosor de 0.7mm correspondiente al hilo.

### 4.6.1 Prueba4

#### 4.6.1.1 Parámetro $S_{11}$

Como se ha mencionado anteriormente las medidas de las antenas se han definido para obtener un coeficiente de reflexión menor de -10db, esta antena tiene un resultado de -20.893dB a una frecuencia de 0.86785 GHz. Se puede observar que la antena cumple los requisitos en la Figura 28.

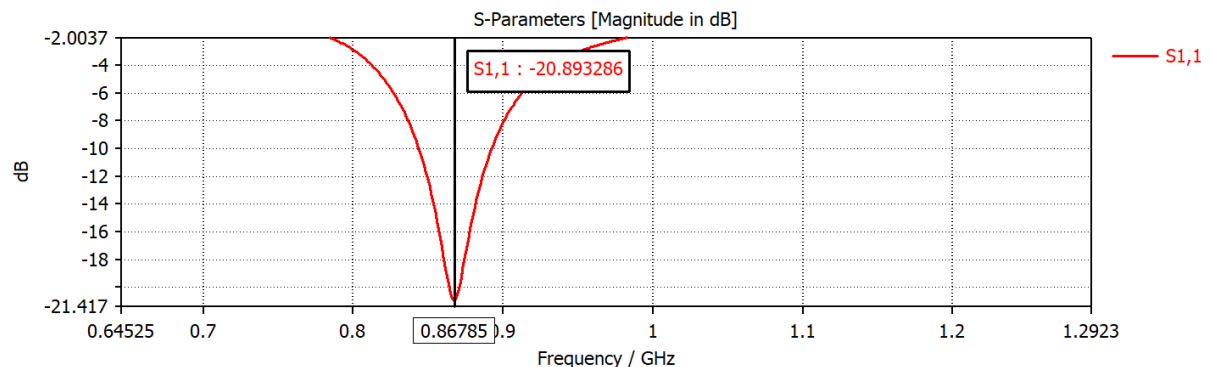


Figura 28: Gráfica Parámetro  $S_{11}$  de la Prueba4

#### 4.6.1.2 Eficiencia

La eficiencia depende de la relación entre la directividad y la ganancia, cuanto más se aproximen los dos valores, la eficiencia se acercará más al valor 1 ya que sería una eficiencia ideal y por lo tanto la antena no tendría pérdidas. Esta antena en una frecuencia 868MHz, aproximadamente, tiene una eficiencia del 97% por lo que se acerca bastante a 1, es decir, el 100%.

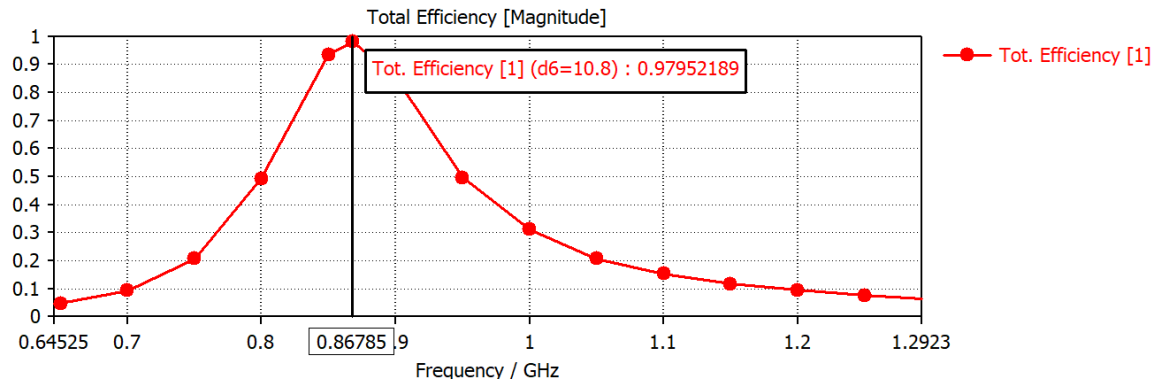


Figura 29: Representación de la eficiencia de la Prueba4

#### 4.6.1.3 Ganancia

Para obtener la ganancia real de la antena, se ha medido con la opción *Realized Gain* para tener en cuenta las pérdidas por reflexión en la entrada de la antena. En este caso, lo hemos representado en 3D, pero también se podría en polar y cartesiano. En la Figura 30 podemos observar que para  $\Phi=0$ , la máxima ganancia en 868MHz, será de 1.62 dB, un resultado satisfactorio para las condiciones de la antena.

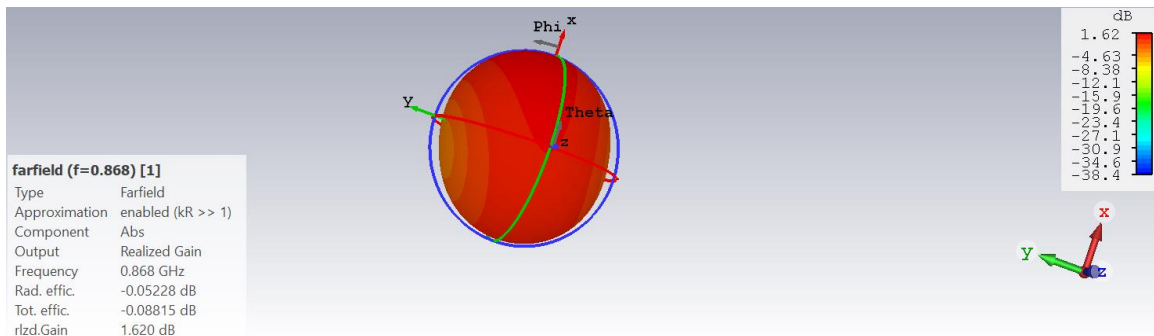


Figura 30: Representación del Realized Gain en 3D de la Prueba4

CST Studio proporciona la opción de calcular para todas las frecuencias la ganancia (*Realized Gain*), incluyendo las pérdidas. Se puede observar que la máxima ganancia se obtiene en la frecuencia 868MHz.

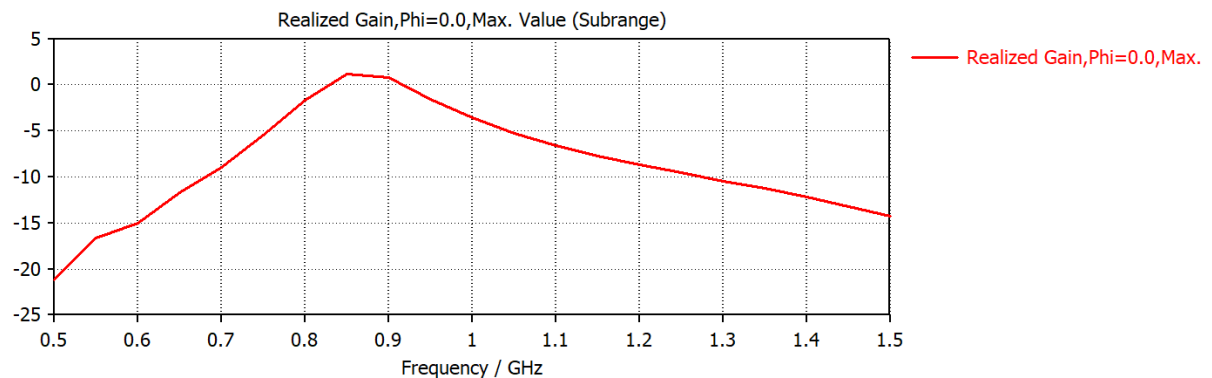


Figura 31: Representación de la ganancia para cada frecuencia de la Prueba4

#### 4.6.1.4 Directividad

A raíz del diagrama de radiación, obtenemos también la directividad de la antena para 868MHz, mirando en la constante  $\Phi=0$ , el resultado es de 1.708dBi.

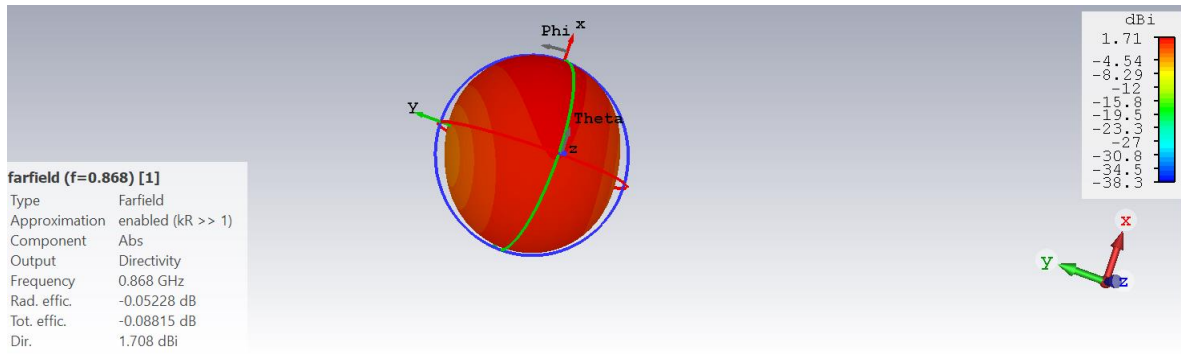


Figura 32: Representación de la directividad en 3D de la Prueba4

#### 4.6.1.5 Campo eléctrico

En la siguiente Figura 33 apreciamos el campo eléctrico de la antena a una frecuencia de 868MHz, esta representa el máximo voltaje por metro que podría proporcionar la antena, este será 10656.1 V/m. Se puede observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** que donde habrá más tensión será en el extremo derecho de la antena.

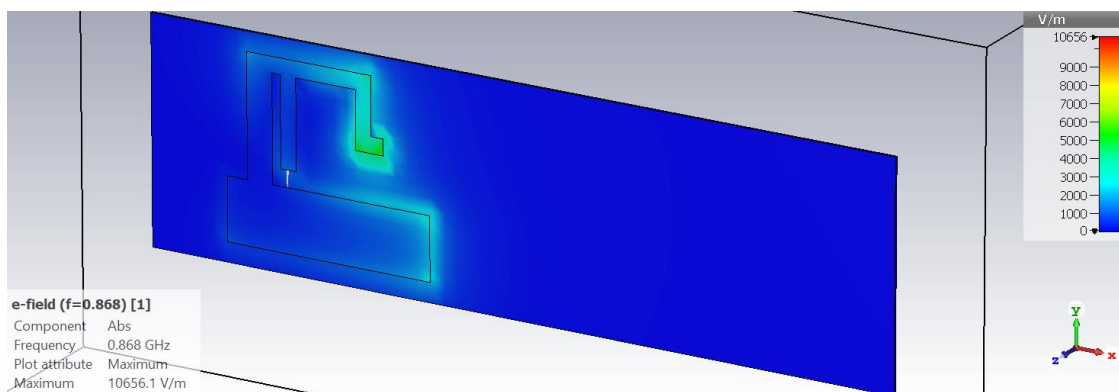


Figura 33: Representación del campo eléctrico de la Prueba4

## 4.6.2 Prueba3

### 4.6.2.1 Parámetro S11

Al igual que la anterior antena, esta también está por debajo de -10dB, con un resultado de -15.107525dB a la frecuencia 868MHz. En la siguiente Figura 34 se puede apreciar los resultados obtenidos y que cumple los requisitos.

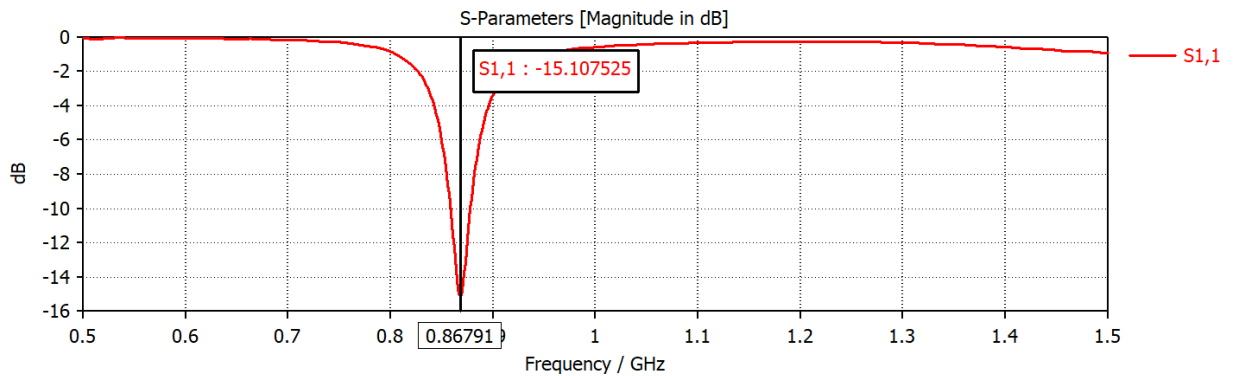


Figura 34: Gráfico del parámetro S11 de la Prueba3

### 4.6.2.2 Eficiencia

En este caso su eficiencia en la frecuencia que radia la antena es del 95%, un valor bastante cercano a 100, por lo que se puede considerar que su eficiencia es buena.

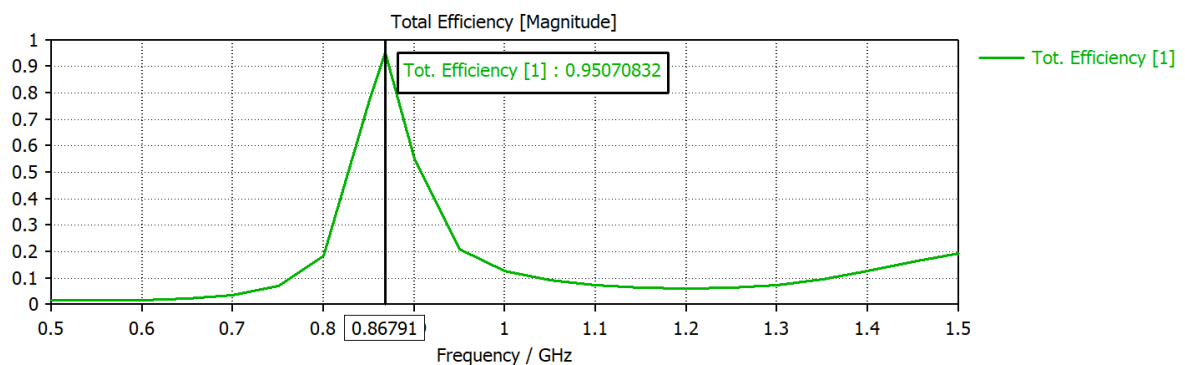


Figura 35: Gráfico de la eficiencia total de la Prueba3



#### 4.6.2.3 Ganancia

Como en el caso anterior, se ha medido en la constante  $\phi=0$ , la ganancia teniendo en cuenta las pérdidas, obteniendo un valor de 3.9dB en 868MHz, más elevado que la anterior antena, por lo tanto, esta será mejor.

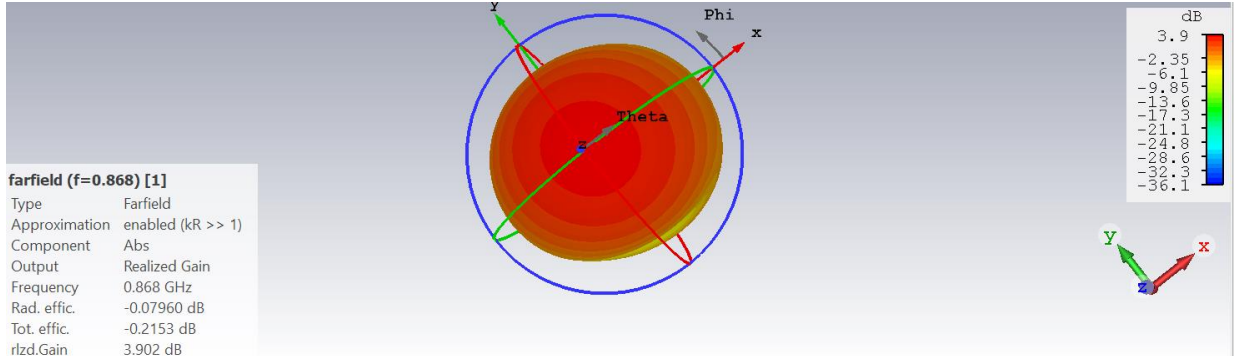


Figura 36: Representación 3D del Realized Gain de la Prueba3

También se ha medido el voltaje en todas las frecuencias y podemos observar que el pico de máxima ganancia es 2.788 en 863.05 MHz (Figura 37).

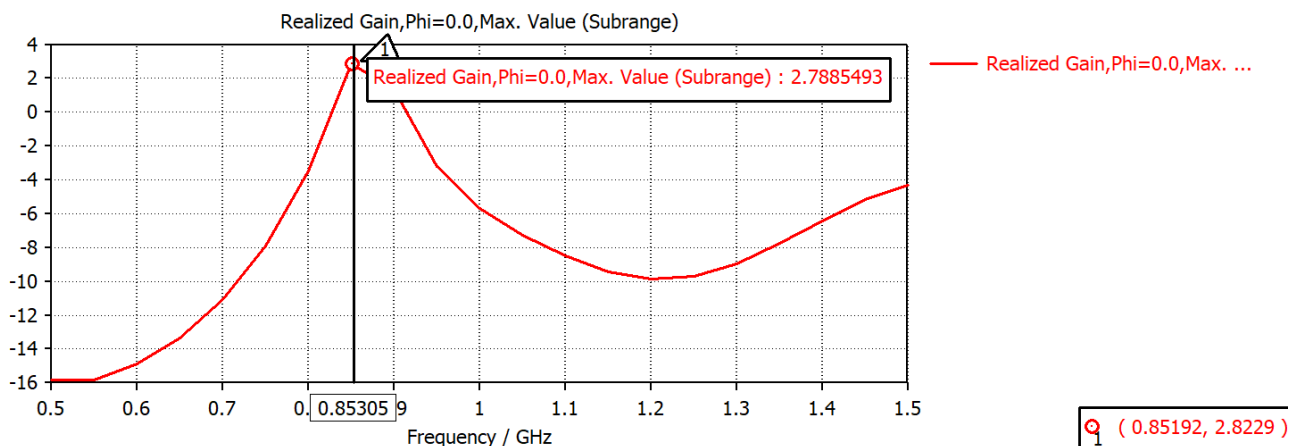


Figura 37: Representación de la ganancia para cada frecuencia de la Prueba3

#### 4.6.2.4 Directividad

Los resultados de la directividad en el gráfico 3D para 868MHz son de 4.12dBi para  $\phi$  constante=0 (Figura 38).

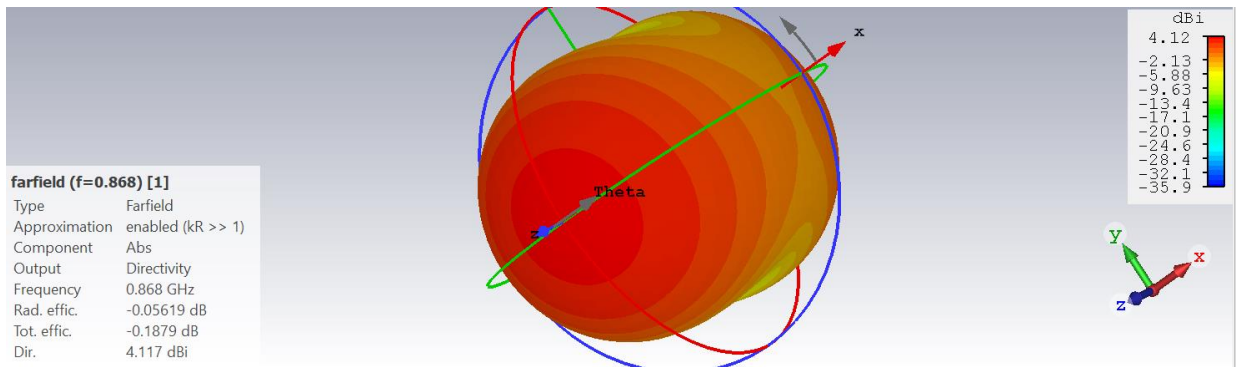


Figura 38: Representación 3D de la directividad de la Prueba3

#### 4.6.2.5 Campo Eléctrico

También se ha medido el Voltaje por metro máximo para una frecuencia de 868MHz y el resultado ha sido de 14741.5V/m, mucho más elevado que el caso anterior. En esta antena, donde predomina el valor máximo es en el centro.

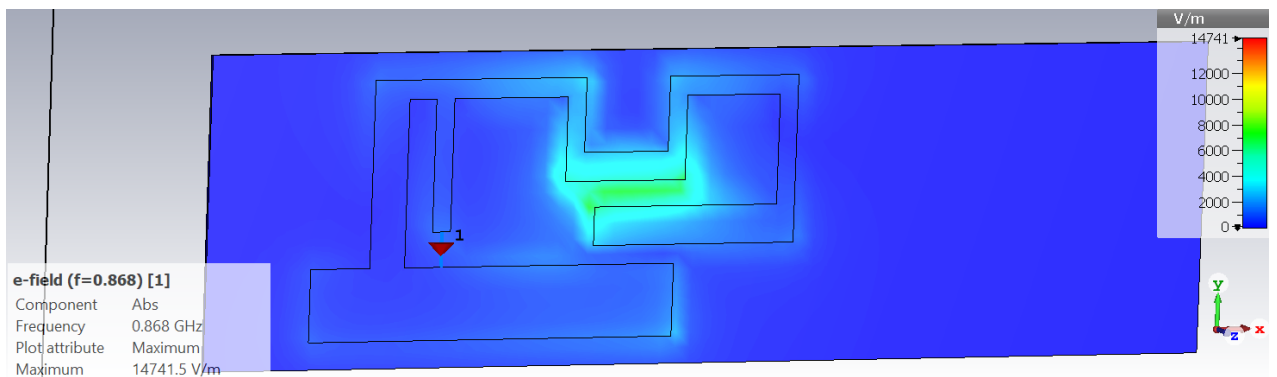


Figura 39: Representación del campo eléctrico de la Prueba3

## 4.7 Resultados moldeando la antena

Antes de hacer una simulación sobre una parte del cuerpo humano con modelos proporcionados por el software CST, se han hecho simulaciones poniendo un cilindro vacío detrás de la antena y adaptando esta a su forma, representando que la antena se adapte a la forma de la ropa pudiéndose producir arrugas o simplemente que se deforme por adaptarse a la parte del cuerpo correspondiente, en ese caso se ha elegido la pierna y los cilindros son de un tamaño real y representativo de esta parte del cuerpo, utilizando diferentes radios para comprobar como influían en los resultados. Como ya se ha comentado anteriormente, se podría hacer en otras partes del cuerpo como por ejemplo la espalda, un pie, un brazo, ... zonas ligeramente curvadas.

El análisis ha sido el mismo, al igual que en las condiciones anteriores, pero ahora con la antena curvada. La predicción es que los resultados sean peores

que en las condiciones iniciales ya que la antena está siendo modificada y puede afectar en la reflexión del puerto. Se espera que los resultados varíen más en la Prueba3 ya que es más grande y se deforma más.

#### 4.7.1 Prueba4

En la prueba4 se han utilizado varios radios en dirección del eje X, ya que en las otras direcciones los resultados eran muy diferentes a los de la antena en condiciones iniciales, por lo que al coser la antena se tuvo en cuenta la dirección en la que iría en el pantalón.

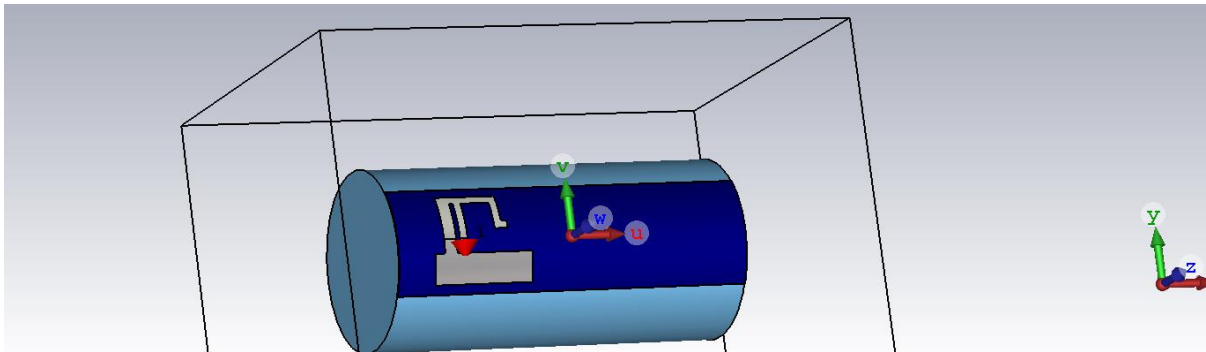


Figura 40: Prueba3 moldeada por un cilindro vacío de radio 70 mm

Radio (mm)	Eficiencia (%)	Directividad (dBi)	Ganancia (dB)	S11 (dB)	S11(MHz)
0	97.9	1.71	1.62	S1,1: -20.893286	867.85
70	97.4	1.67	1.58	S1,1: -24.002637	863.46
85	97.4	1.69	1.6	S1,1: -23.532792	863.46
95	97.3	1.7	1.61	S1,1: -22.767855	862.62

Tabla 4: Comparaciones de los resultados de la antena Prueba4 moldado con diferentes radios

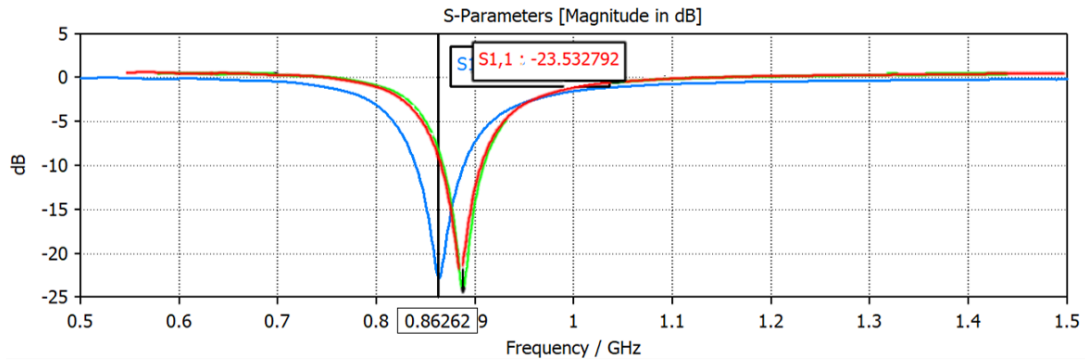


Figura 41: Representación de los diferentes S11 con los diferentes radios

En este caso, la eficiencia casi no ha variado respecto a la inicial, lo que es algo positivo porque, aunque la antena se doble casi no habrá pérdidas y la antena seguirá siendo robusta. Y esto, nos lleva a que la directividad y la ganancia tampoco cambien. En cambio, la frecuencia en el parámetro S11 sí que se ha desplazado a valores más pequeños, aunque, de todas formas, no varía en más de 5MHz. Se puede considerar que para haber modificado el estado de la antena se podrían considerar buenos resultados. Realmente, como la antena es pequeña y no ocupa ni la mitad de la circunferencia que se asigna a la pierna, se deforma poco en comparación con la siguiente, que al ser más grande se deformará más y habrá más cambios en los diferentes radios.

#### 4.7.2 Prueba3

En la Prueba3 también se ha colocado la antena en el eje X, en este caso era bastante lógico ponerla en este sentido porque es más grande y en otras direcciones se hubiera doblado mucho más e influiría mucho en los resultados, obteniendo valores muy diferentes a los iniciales.

Radio (mm)	Eficiencia (%)	Directividad (dBi)	Ganancia (dB)	S11 (dB)	S11(MHz)
0	95	4.12	3.9	S1,1: -15.107525	867.91
70	90.2	4.7	3.69	S1,1: -15.357418	861.71
85	90.2	4.09	3.77	S1,1: -14.893189	861.71
95	91.1	4.1	3.79	S1,1: -15.003923	863.46

Tabla 5: Comparativa de los resultados de la antena Prueba3 moldado con diferentes radios

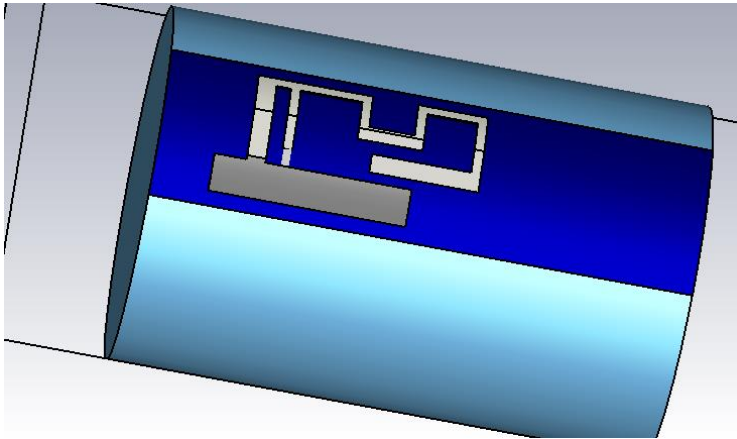


Figura 42: Prueba4 moldeada por un cilindro vacío de radio 95 mm

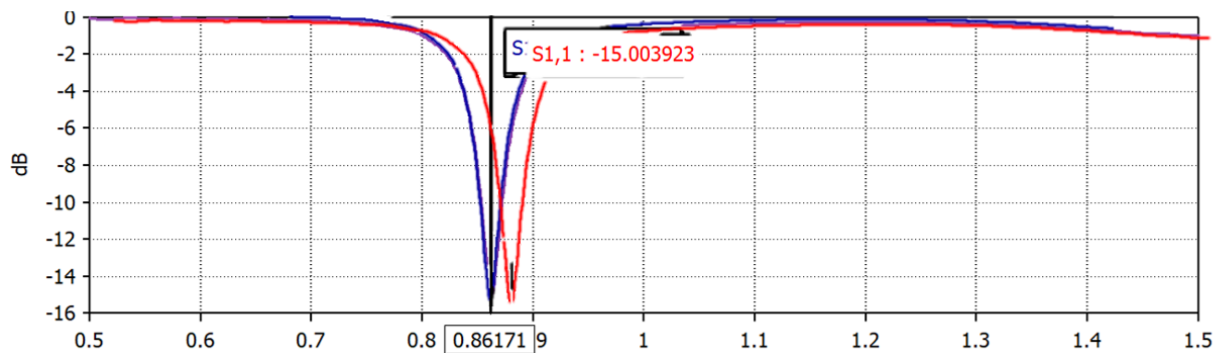


Figura 43: Representación de los diferentes S11 con los diferentes radios

Con esta antena, al ver que se moldea más debido a sus dimensiones, comprobamos que la diferencia, entre la eficiencia inicial y las demás, es más grande que no en la anterior antena. Por lo tanto, estará perdiendo cualidades. Respecto al parámetro S11 (Figura 43), tiene un comportamiento parecido al anterior, en el radio de valor 70 y 85 se obtienen valores casi iguales y en el de 95 como es más grande y no deforma tanto la antena la frecuencia se acercará más a la inicial, pero aún y así, también estará desplazada a frecuencias menores. Con radios más pequeños, como la superficie de la antena se moldeará más, sus resultados son más distorsionados que en radios grandes. Se comprobó que con radios superiores a 100mm los resultados ya eran muy parecidos a los de la antena sin curvar.

## 4.8 Resultados SAR

Para comprobar que nuestras antenas no afecten al cuerpo humano, se ha simulado con el software CST Studio Suite el SAR y así consultar si están por debajo del límite permitido. CST Studio Suite ofrece varios biomodelos voxel, de personas basados en estudios reales, incluyendo órganos y tejido.

Dependiendo del cuerpo, edad, género y la posición, la antena variará, en menor o mayor escala, sus resultados respecto a sus condiciones iniciales.

Se han usado 4 modelos de voxel diferentes para comprobar el efecto en un niño y en personas adultas. Los modelos elegidos han sido Child, Laura, Emma y Gustav, con 7, 43, 26 y 38 años, respectivamente. Se han elegido estos modelos para experimentar con diversos cuerpos de diferentes edades y géneros. A continuación, se muestra la Figura 44 con todas las medidas de los cuerpos.

Model	Age/Sex	Size/cm	Mass/kg	Resolution / mm
Baby	8-week female	57	4.2	$0.85 \times 0.85 \times 4.0$
Child	7y female	115	21.7	$1.54 \times 1.54 \times 8.0$
Donna	40y female	176	79	$1.875 \times 1.875 \times 10$
Emma	26y female	170	81	$0.98 \times 0.98 \times 10$
Gustav	38y male	176	69	$2.08 \times 2.08 \times 8.0$
Laura	43y female	163	51	$1.875 \times 1.875 \times 5.0$
Katja	43y pregnant	163	62	$1.775 \times 1.775 \times 4.84$

*Figura 44: Tabla de los diferentes biomodelos Voxel que ofrece CST Studio para el estudio del SAR*

Para la aceleración del proceso de la simulación, se ha elegido la pierna izquierda de cada uno de los modelos en lugar de todo el cuerpo y se ha adjuntado el compuesto de la antena más el sustrato de tejano, justo encima de la pierna. En este apartado, se mostrarán todas las figuras para 10g y 1g de cada modelo y también la gráfica del parámetro S11 para ver cómo reacciona la antena colocada en la parte superior de la zona. Según la normativa de los diferentes países, los resultados deberán ser iguales o inferiores a 1.6W/Kg en 1g de tejido y 2W/KG en 10g de tejido.

Se ha establecido una potencia de 0.05W.

#### 4.8.1 Child

Este es el modelo del niño de 7 años. Consiguientemente, se espera que los resultados sean los más elevados porque es el que tendrá los tejidos más sensibles. Nos encontramos que la frecuencia apenas se modifica, de 868MHz que sería la ideal, en este caso baja a 850 y 859 MHz. Si nos fijamos en los resultados en la Tabla 6, observamos que están por debajo del límite impuesto, mencionado anteriormente, aún y así, son los más elevados, como estaba previsto. En este caso, tanto en la Prueba3 como en la Prueba4, tienen una zona de gran magnitud en la que se radia al máximo.

Child			
	Prueba3	Prueba4	Límite permitido
frecuencia	0.85GHz	0.859GHz	
S11	-10.9dB	-31.58dB	
10g	1.026W/Kg	0.2179W/Kg	2W/Kg
1g	0.1539W/Kg	0.2603W/Kg	1.6W/Kg
%del valor SAR sobre el límite permitido con 10g	51.3	10.85	
%del valor SAR sobre el límite permitido con 1g	9.62	16.26	

Tabla 6: Resultados del modelo Child

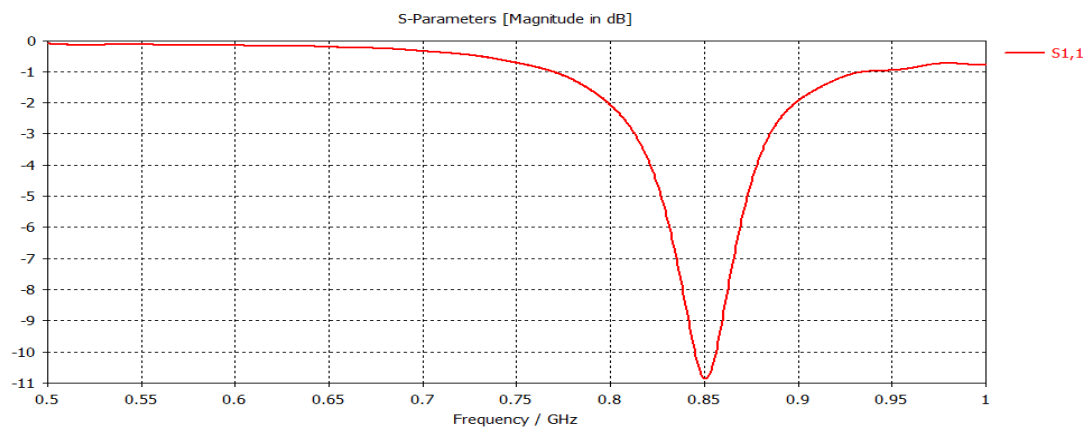


Figura 45: Parámetro S11 de la Prueba3 con el modelo Child

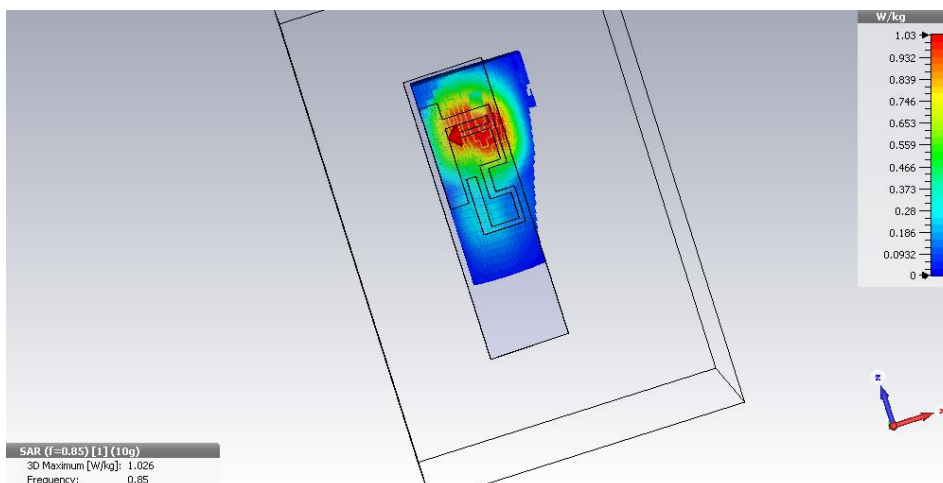


Figura 46: Representación del SAR del modelo Child en 10g Prueba3



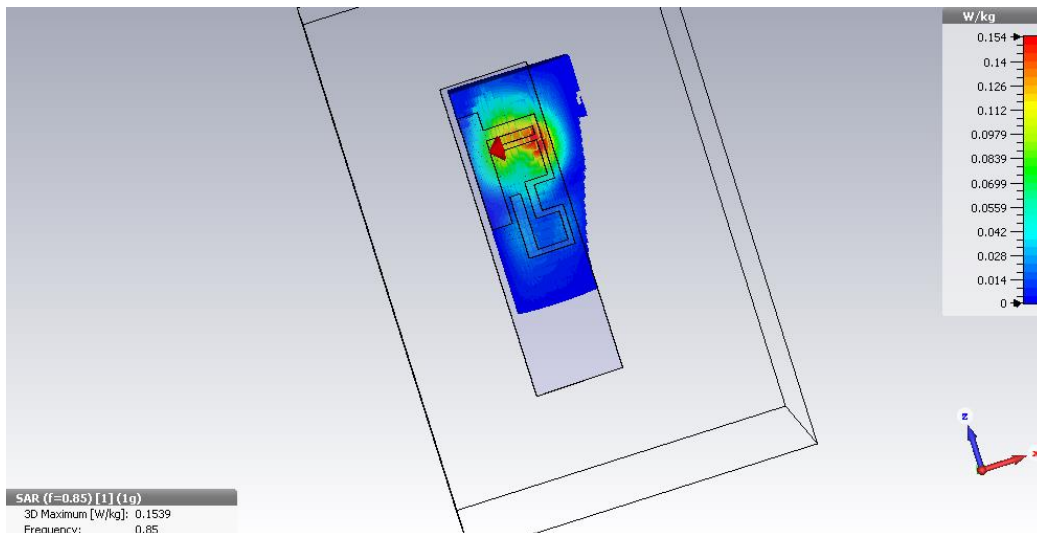


Figura 47: Representación del SAR del modelo Child en 1g Prueba3

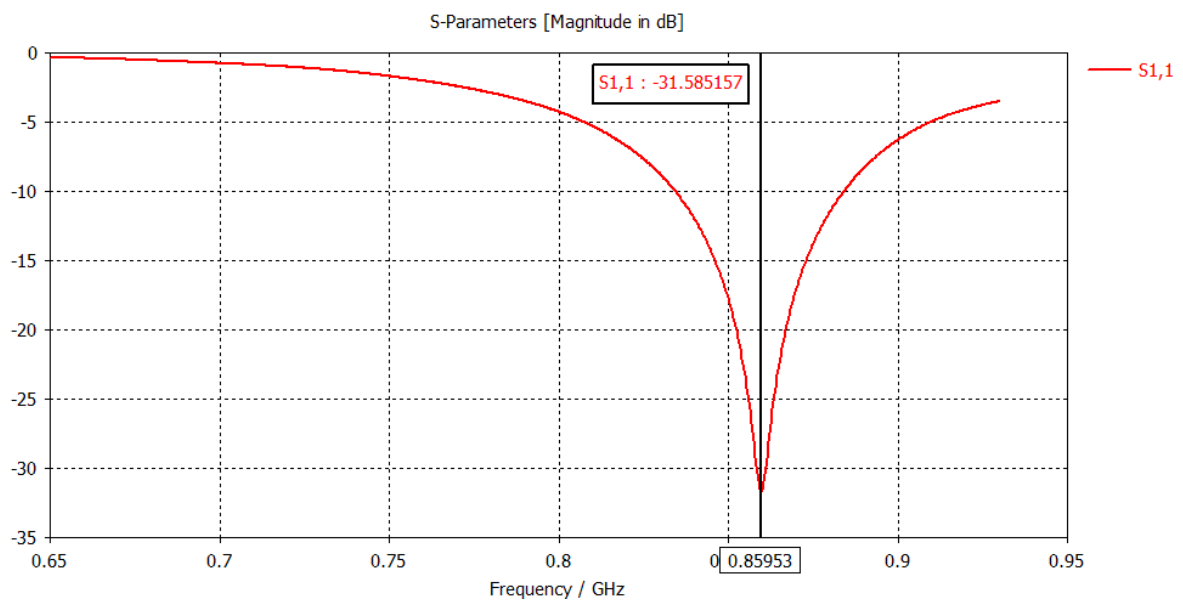


Figura 48: Parámetro S11 de la Prueba4 con el modelo Child

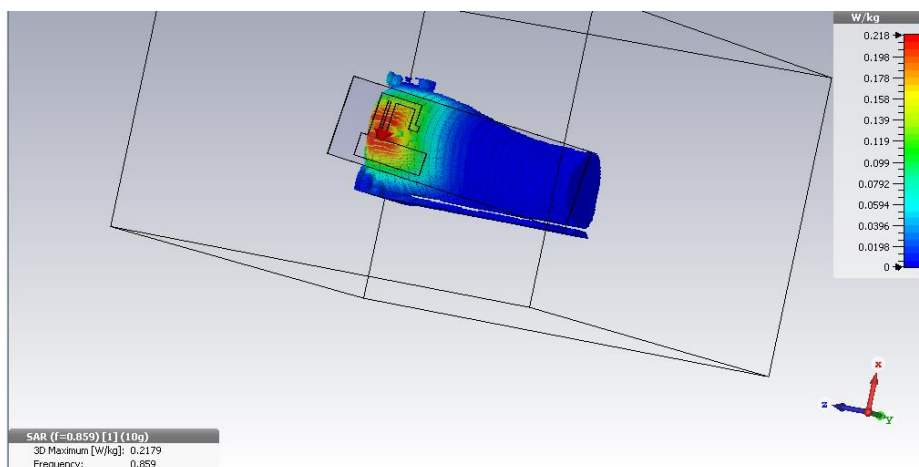


Figura 49: Representación del SAR del modelo Child en 10g Prueba4



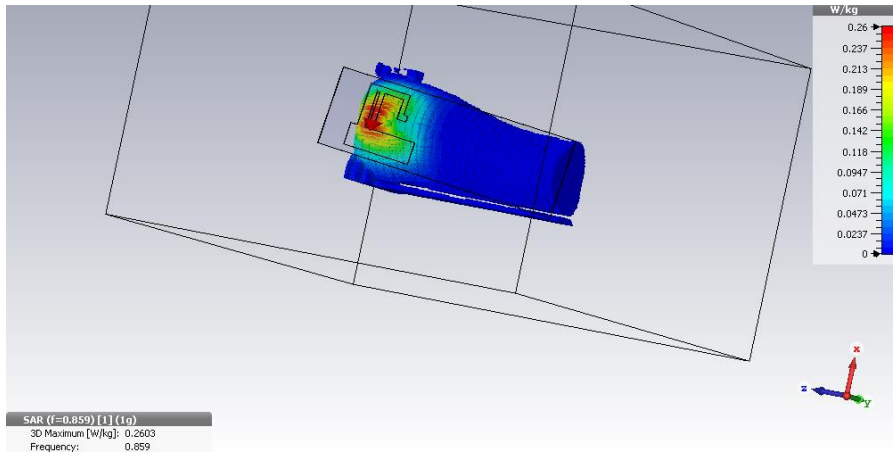


Figura 50: Representación del SAR del modelo Child en 1g Prueba4

## 4.8.2 Emma

Emma es el biomodelo que se caracteriza porque es el que tiene el valor de masa más elevado, 81Kg. Por lo tanto, lo que se espera es que haya pequeñas afectaciones en los resultados. Como podemos comprobar en la Tabla 7 si lo comparamos con el resto de modelos, es el que tiene los resultados más cercanos a 0 y consecuentemente, los inferiores.

Emma			
	Prueba3	Prueba4	Límite permitido
frecuencia	0.856GHz	0.859GHz	
S11	-12.199dB	-12.389dB	
10g	0.0335W/Kg	0.03777W/Kg	2W/Kg
1g	0.0646W/Kg	0.0669W/Kg	1.6W/Kg
%del valor SAR sobre el límite permitido con 10g	1.67	1.89	
%del valor SAR sobre el límite permitido con 1g	4.04	4.18	

Tabla 7: Comparativa y resultados SAR del sujeto Emma

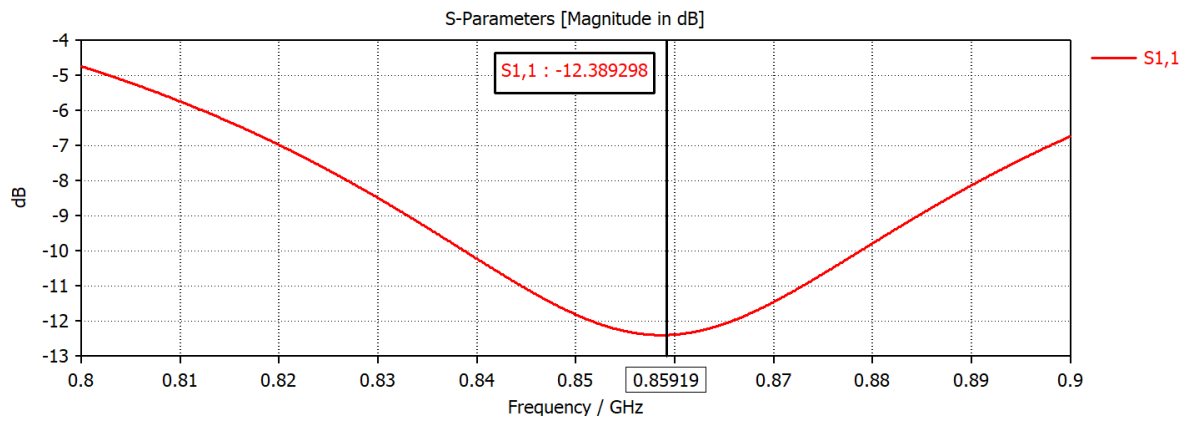


Figura 51: Resultados parámetro S11 de la Prueba4 con el modelo Emma

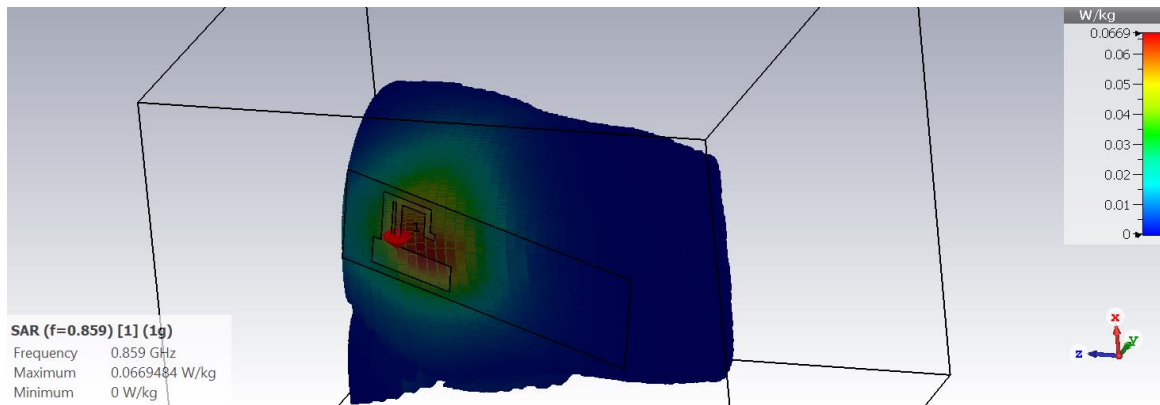


Figura 52: Representación del SAR del modelo Emma en 10g Prueba4

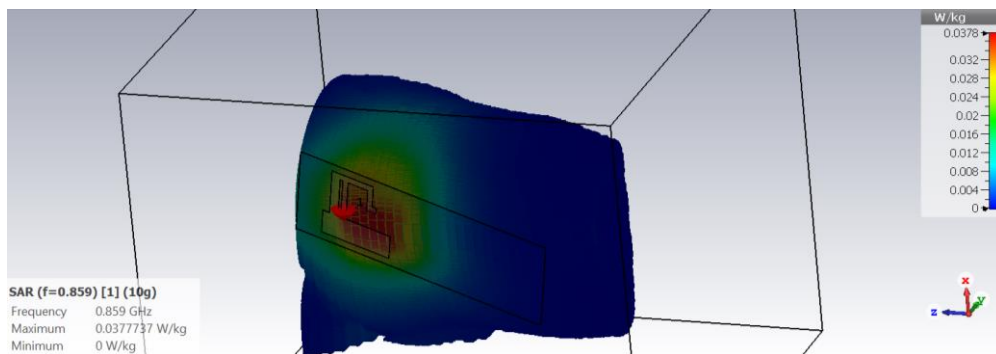


Figura 53: Representación del SAR del modelo Emma en 1g Prueba4

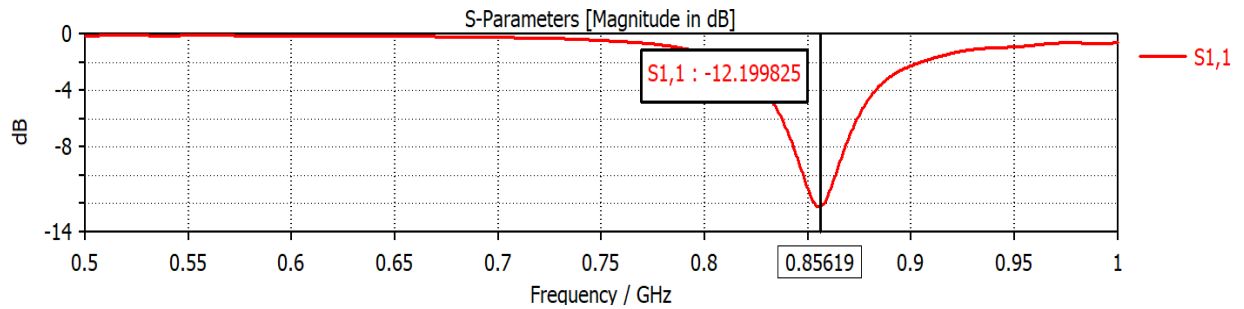


Figura 54: Resultados parámetro S11 Prueba3 modelo Emma

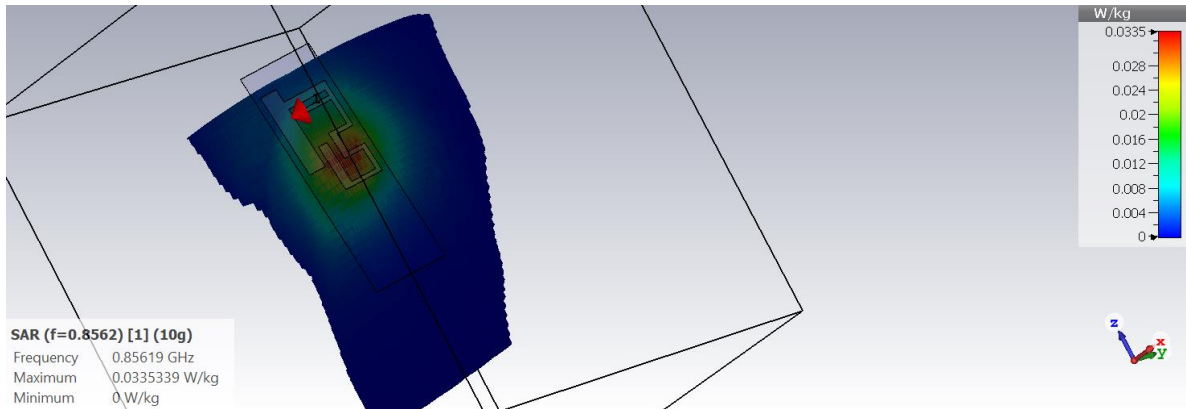


Figura 55: Representación del SAR del modelo Emma en 10g Prueba3

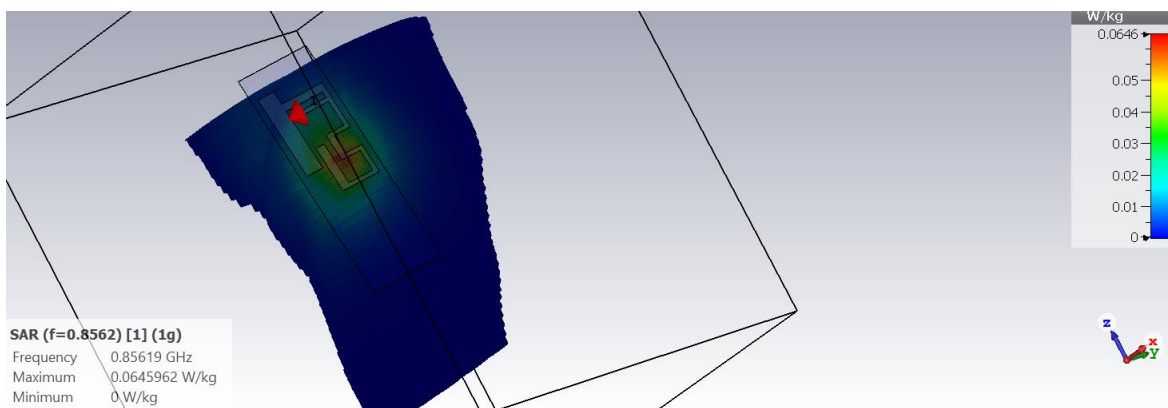


Figura 56 Representación del SAR del modelo Emma en 1g Prueba4

### 4.8.3 Gustav

Gustav es el modelo que representa un hombre de 38 años, de los modelos elegidos es el único hombre. Como curiosidad, en la antena Prueba3, el parámetro S11 obtenemos un resultado para la frecuencia 770 MHz, -2.1dB. A parte de que la frecuencia ha variado unos 100MHz, -2.1dB es un valor demasiado elevado para la antena, ya que para obtener resultados óptimos debería estar por debajo de -10dB. Aún y así, todos los resultados están dentro de los valores establecidos legalmente.

Gustav			
	Prueba3	Prueba4	Límite permitido
frecuencia	0.77GHz	0.884GHz	
S11	-2.1dB	-15.6795dB	
10g	0.0337W/Kg	0.0872W/Kg	2W/Kg
1g	0.1539W/Kg	0.1362W/Kg	1.6W/Kg
%del valor SAR sobre el límite permitido con 10g	1.89	4.36	
%del valor SAR sobre el límite permitido con 1g	9.62	8.51	

Tabla 8: Comparativa y resultados del SAR con el modelo Gustav

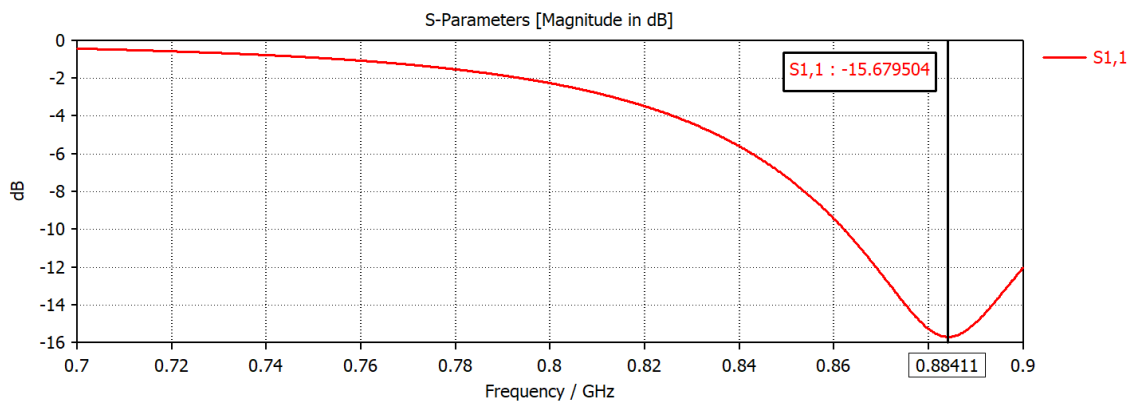


Figura 57: Resultados parámetro S11 en la Prueba4 modelo Gustav

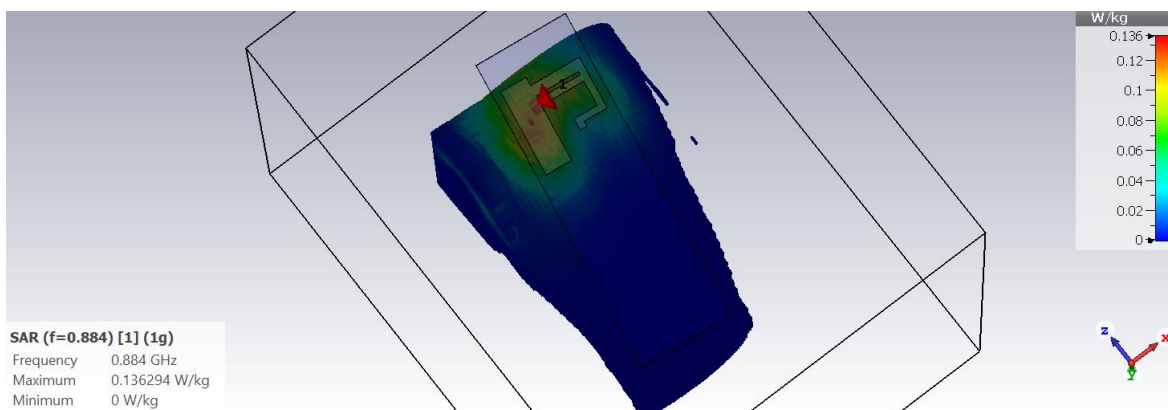


Figura 58: Representación del SAR del modelo Gustav en 10g Prueba4

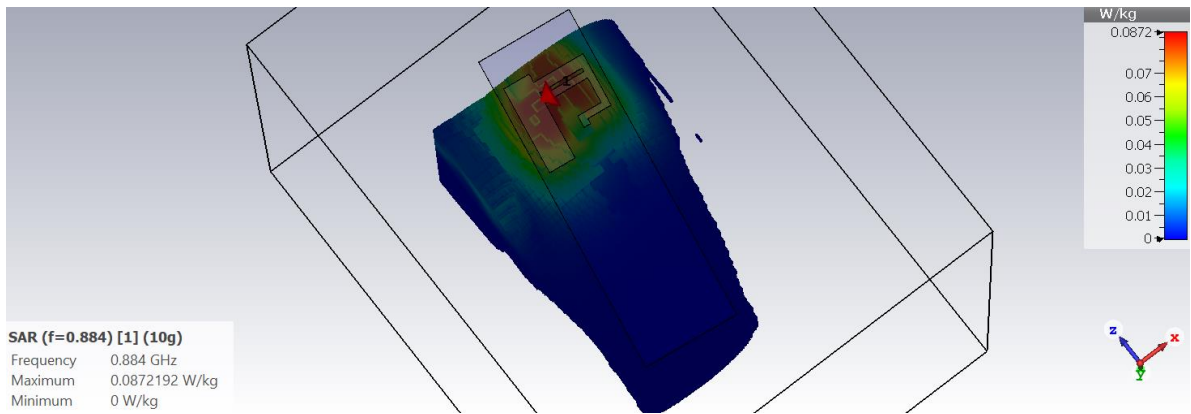


Figura 59: Representación del SAR del modelo Gustav en 1g Prueba4

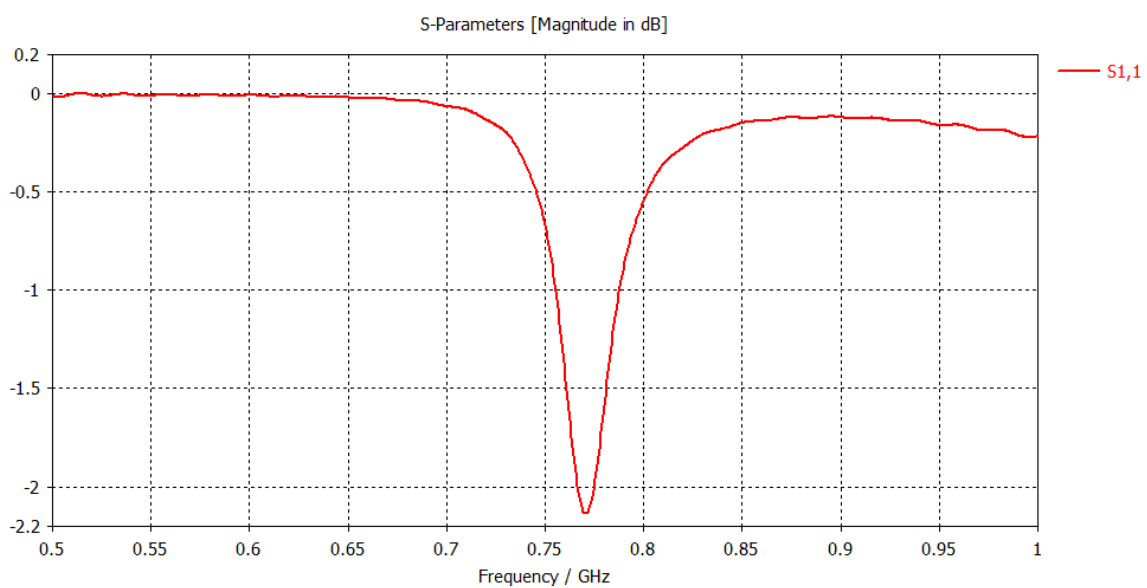


Figura 60: Resultados parámetro S11 de la Prueba3 modelo Gustav

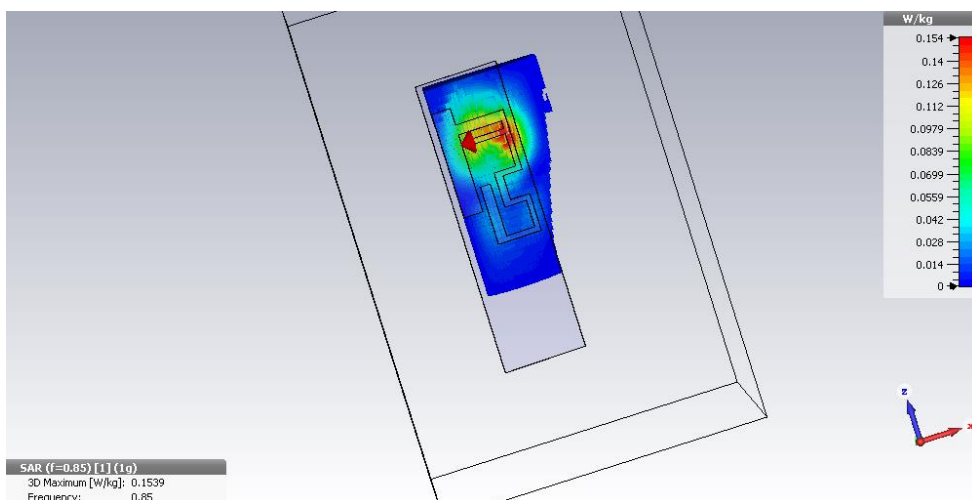


Figura 61: Representación del SAR del modelo Gustav en 10g Prueba3

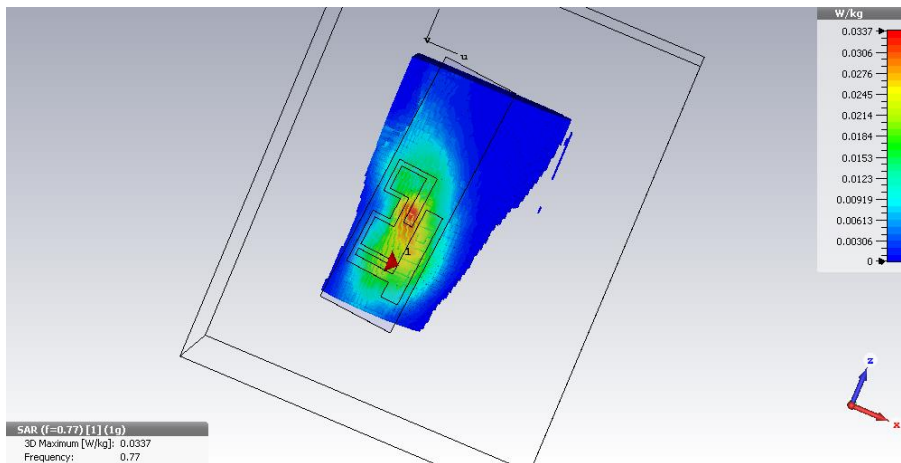


Figura 62: Representación del SAR del modelo Gustav en 1g Prueba3

#### 4.8.4 Laura

El modelo de Laura representa a una mujer de 43 años, es el caso con mayor edad, con lo cual, el tejido es más viejo que los anteriores. Los resultados han sido muy positivos, ya que en el parámetro S11 la banda de trabajo está por debajo de -10 dB y las frecuencias son parecidas a la inicial y todos los resultados del SAR están muy por debajo del límite establecido.

Laura			
	Prueba3	Prueba4	Límite permitido
frecuencia	0.856GHz	0.848GHz	
S11	-12.214dB	-17.59dB	
10g	0.0468W/Kg	0.0962W/Kg	2W/Kg
1g	0.0979W/Kg	0.2028W/Kg	1.6W/Kg
%del valor SAR sobre el límite permitido con 10g	2.34	4.81	
%del valor SAR sobre el límite permitido con 1g	6.12	12.68	

Tabla 9: Comparativa y resultados del SAR con el modelo Laura

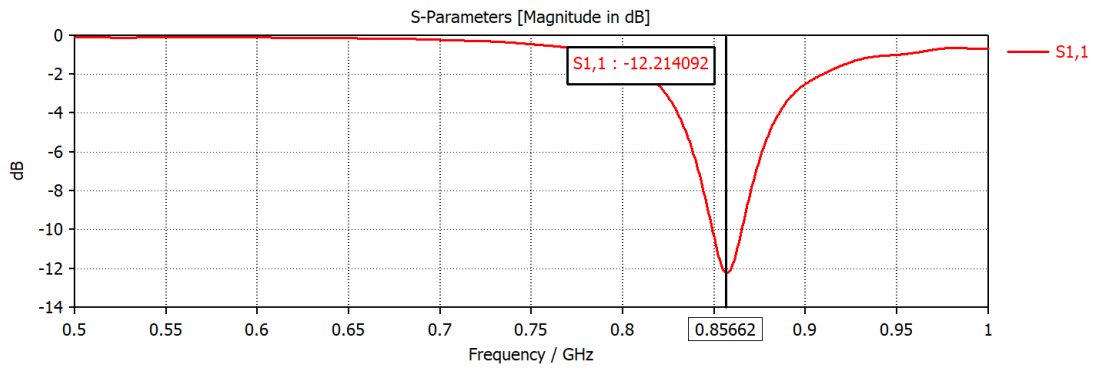


Figura 63: Resultados parámetro  $S_{11}$  Prueba3 modelo Laura

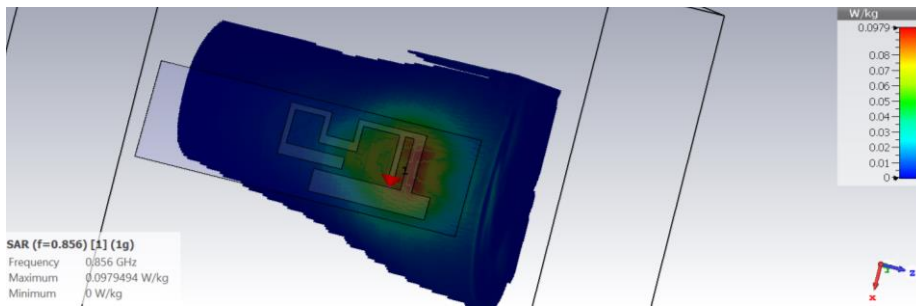


Figura 64: Representación del SAR del modelo Laura en 1g Prueba3

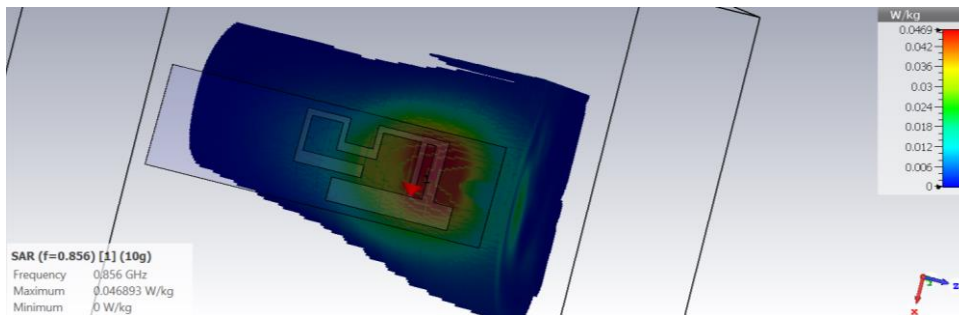


Figura 65: Representación del SAR del modelo Laura en 10g Prueba3

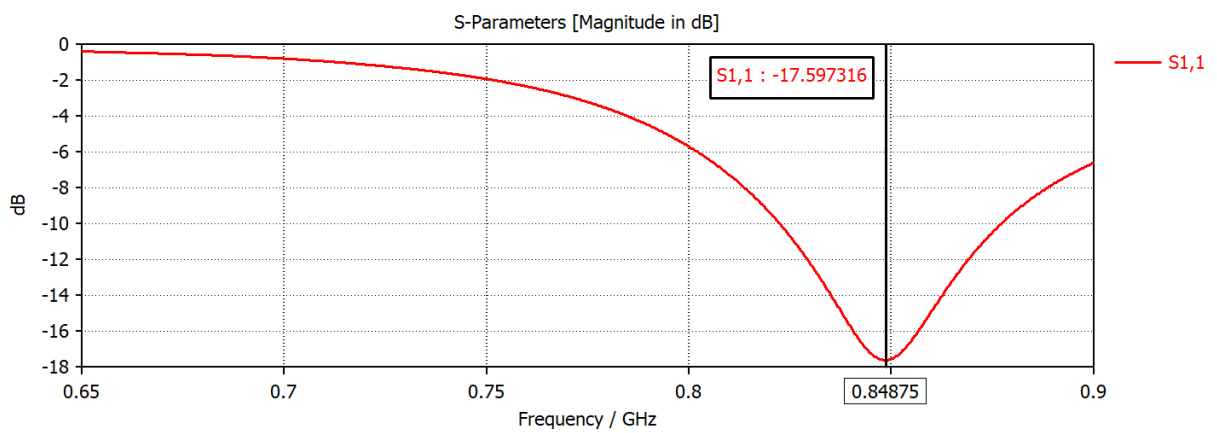


Figura 66: Representación del parámetro  $S_{11}$  Prueba 4 modelo Laura



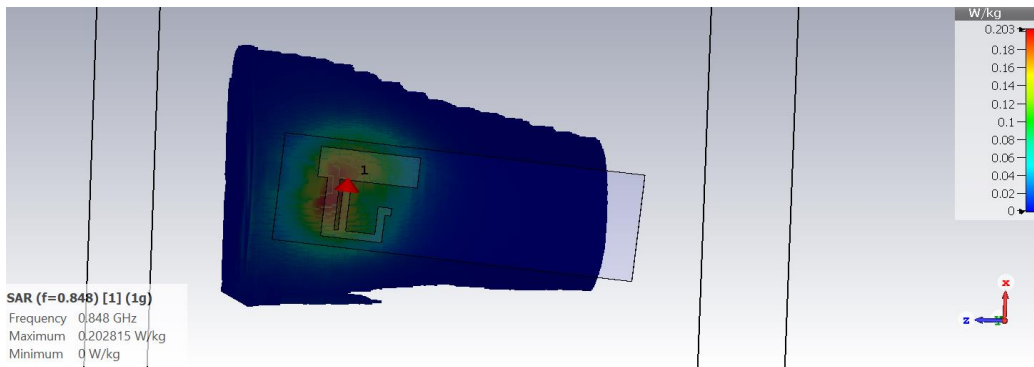


Figura 67: Representación del SAR del modelo Laura en 10g Prueba4

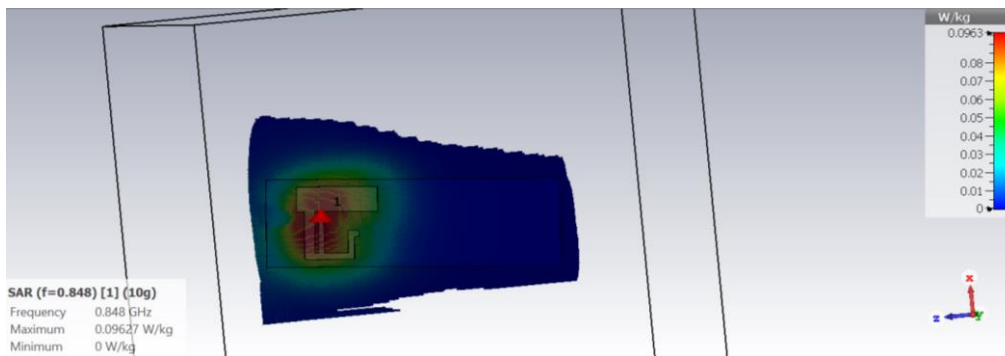


Figura 68: Representación del SAR del modelo Laura en 1g Prueba4

## 5. Procedimiento práctico

En el siguiente apartado se explicarán los pasos a seguir de la confección de la antena, con todos los softwares utilizados, cómo se ha llevado a cabo, la maquinaria utilizada y las medidas en ámbito práctico y se compararán con las de la simulación. Se espera que los resultados varíen respecto a los teóricos porque, aparte de que las condiciones no serán las ideales, el cuerpo humano y las condiciones medioambientales afectarán en la absorción, el retardo, el distorsionado y la atenuación de señales, asimismo, el hecho de que el sustrato se pueda moldear, como se ha visto en el marco teórico, a la práctica, afectará mucho más.

### 5.1 Confección de la antena

En primer lugar, se ha recortado una parte del tejano para poder coser la antena en la parte que correspondería de la pierna y se ha tensado mediante un bastidor de bordado con tal de facilitar el proceso de bordado de la antena a la máquina.





*Figura 69: Bastidor de bordado para tensar la tela*

Para poder coser la antena en el tejano, lo primero que se ha hecho es exportar el archivo 2D Gerber que contendrá los elementos de la capa que tengamos en  $z=0$ , este archivo es la representación de la antena en 2D y lo convertiremos a JPG con el programa Gerbview, con tal de que la antena quede representada con la mejor precisión posible. A continuación, introduciremos el archivo jpg en el software Digitizer Ex, su función será crear bordados, importando imágenes que simula las puntadas en 3D. Este software también ofrece la opción de configurar las características de bordado, con tal de que la máquina borde sin problemas y la antena tenga una buena continuidad. El programa Digitizer Ex, una vez se han pasado las órdenes a la máquina, indicará las puntadas que lleva hechas y las totales.



*Figura 70: Máquina de coser, bordando automáticamente la Prueba3*



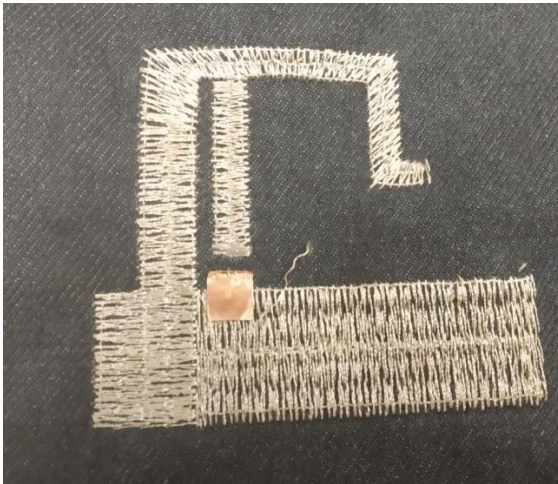
*Figura 71: Resultado del bordado Prueba4 hilo de plata en la parte superior de la máquina*



*Figura 72: Resultado del bordado Prueba3 hilo de plata en la parte superior de la máquina*

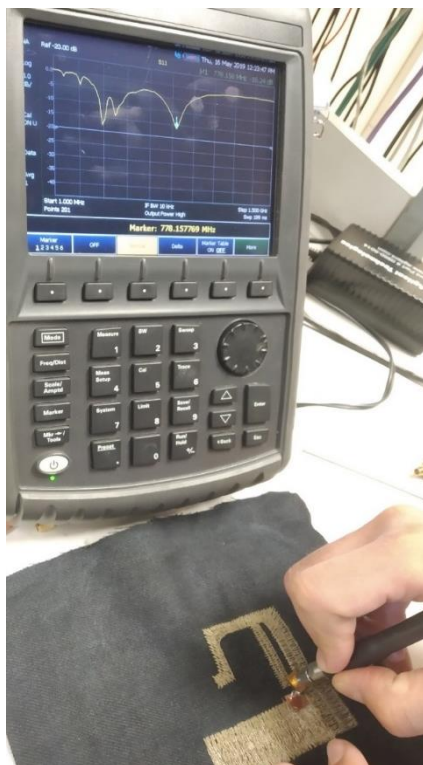


*Figura 73: Resultado del bordado Prueba4 hilo de plata en la parte inferior de la máquina*



*Figura 74: Resultado del bordado Prueba4 hilo de plata en la parte superior de la máquina y añadiendo cinta adhesiva de cobre*

Después de bordar las antenas, se ha comprobado que era mejor poner el hilo de plata en el ovillo inferior de la máquina de coser y se ha repetido para la antena Prueba4. A continuación, se ha comprobado la continuidad con el tester, mirando que todos los puntos de la antena estuvieran conectados. Para poder hacer una primera prueba de medición del parámetro S11, se ha probado de poner un trozo de cinta adhesiva de cobre con tal de que el conector haga contacto con la parte que alimenta la antena y la masa, se puede observar en la Figura 75. Con el analizador, Fieldfox N9916A Microwave analyzer, previamente calibrado, se obtendrá la gráfica del parámetro S11.



*Figura 75: Medición parámetro S11 de forma práctica*

## 5.2 Resultados Prácticos

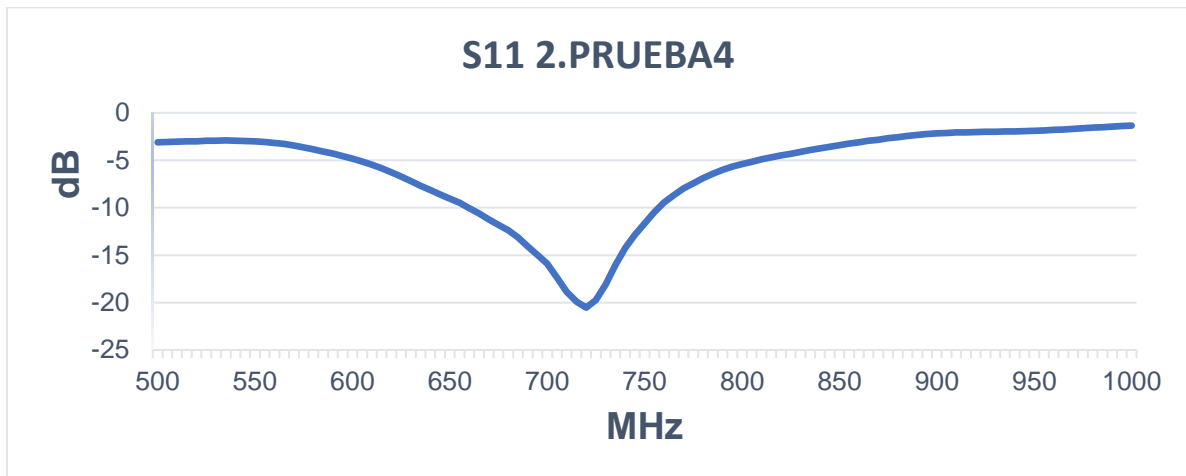


Figura 76: Resultado parámetro S11 Prueba4 hilo metálico a arriba en la máquina de coser

En este caso, la antena tiene un parámetro S11 de -20.533 a una frecuencia de 720 MHz, cuando en la simulación tiene un resultado de -20.893dB a una frecuencia de 867.85 MHz. Vemos que el valor no cambia pero la frecuencia sí, esto es debido a que la antena en la simulación tiene un material metálico idílico y el área de la antena está totalmente recubierta del material, en cambio como se ha podido observar en las imágenes Figura 71, Figura 72 y Figura 73, al bordar la antena siempre habrá huecos en medio y además las condiciones medioambientales o que el material de tejano no tenga la misma  $\epsilon$  supuesta, entre otros factores como por ejemplo la conexión del puerto, pueden hacer variar sus características.

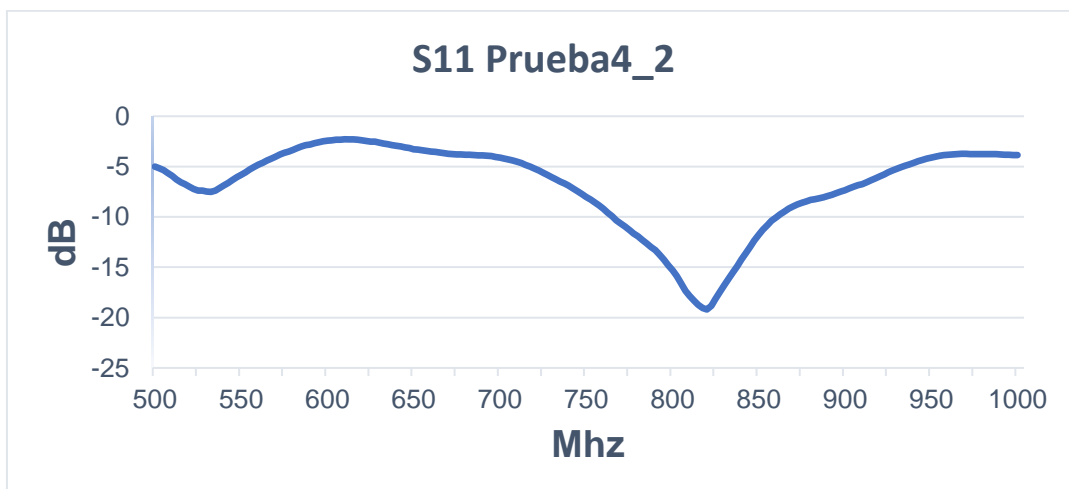
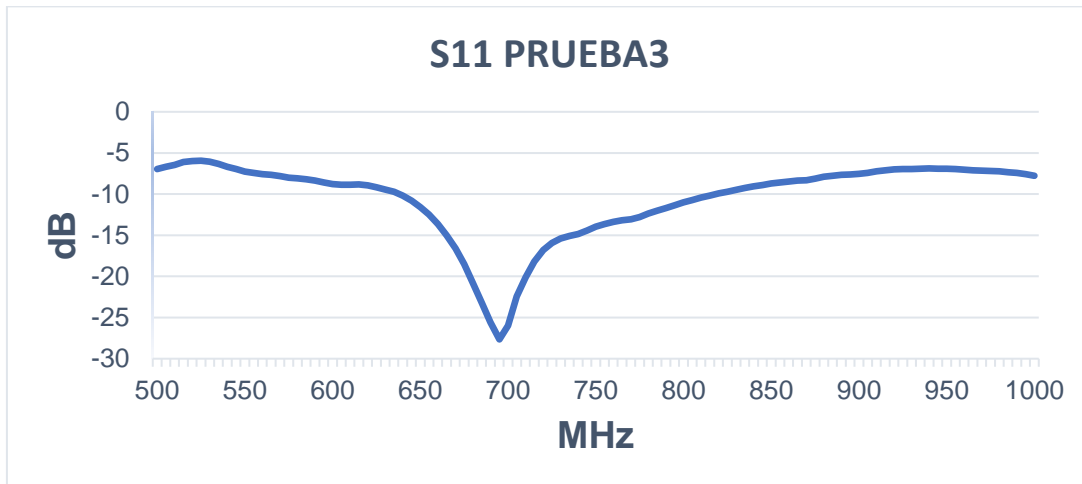


Figura 77: Resultado parámetro S11 Prueba4 hilo metálico a abajo en la máquina de coser



Esta antena es la misma que la anterior explicada, pero la cosimos con el hilo en la parte inferior de la máquina. Tiene un resultado mejorado respecto a la anterior, a 820MHz se obtiene un valor de -19.194dB, no es exactamente la frecuencia a la que queremos trabajar, pero se acerca mucho y, consecuentemente, es un resultado bastante positivo. Respecto al valor de -19.194dB, se parece mucho al teórico: -20.893dB.



*Figura 78: Resultado parámetro S11 Prueba3 hilo metálico a arriba en la máquina de coser*

Si comparamos con los valores de la simulación, en la Figura 78 se puede observar que, en una frecuencia de 695 MHz, obtenemos un resultado de -27.652dB. Por lo tanto, cumpliría el requerimiento de que esté por debajo de los -10dB, pero el pico se ha desplazado a una frecuencia mucho menor. Si recordamos los valores de la simulación, se obtenía un resultado de -15.107525dB a la frecuencia 868MHz. Por lo que se parece muy poco y en este caso, descartaríamos esta antena, ya que sus resultados a la práctica son mucho peores que los de la antena Prueba4.

Para poder obtener resultados más fiables se ha soldado el conector con un cable conductor añadiendo estaño en la cinta adhesiva de cobre con tal de no quemar la antena (Figura 79).

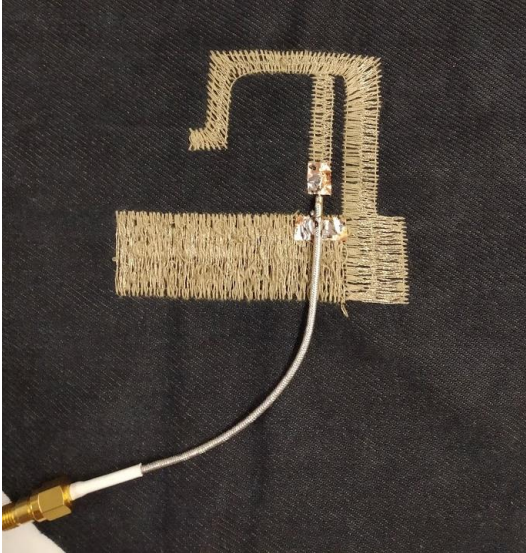


Figura 79: Prueba4 con el conector soldado con estaño

Una vez obtenido el parámetro S11, obtendremos la gráfica de la ganancia a varias frecuencias, para eso se ha usado la cámara anecoica, para aislar la antena del exterior y evitar interferencias y mediante el analizador obtendremos el parámetro S21 y aplicando las pérdidas se calculará la ganancia con pérdidas, lo que en la simulación hemos llamado *Realized Gain*. Para ello, hemos colocado la antena encima de una base de Forex pan totalmente recta, a 0°, a una cierta altura, la cámara envía la información al analizador y este nos proporciona la gráfica.

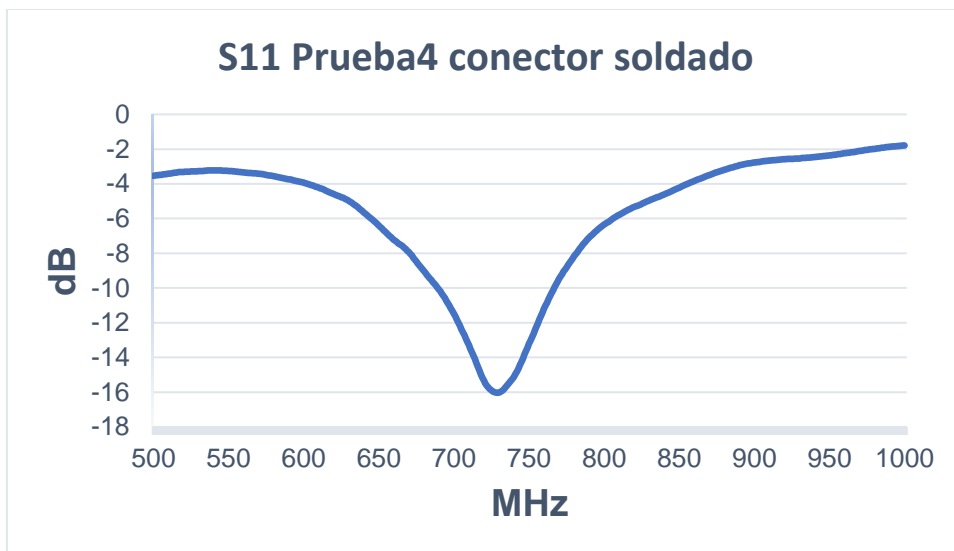
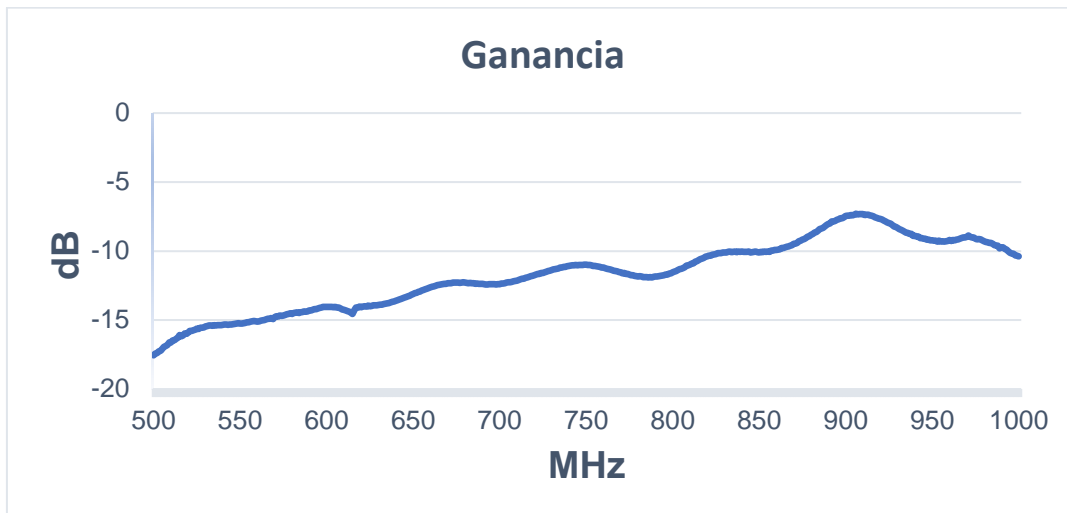


Figura 80: Resultado parámetro S11 Prueba4 hilo metálico a arriba en la máquina de coser

Se puede observar en la Figura 80 que a 729MHz tenemos un parámetro S11 de -16.036, de modo que se ha mejorado el resultado de la antena sin el

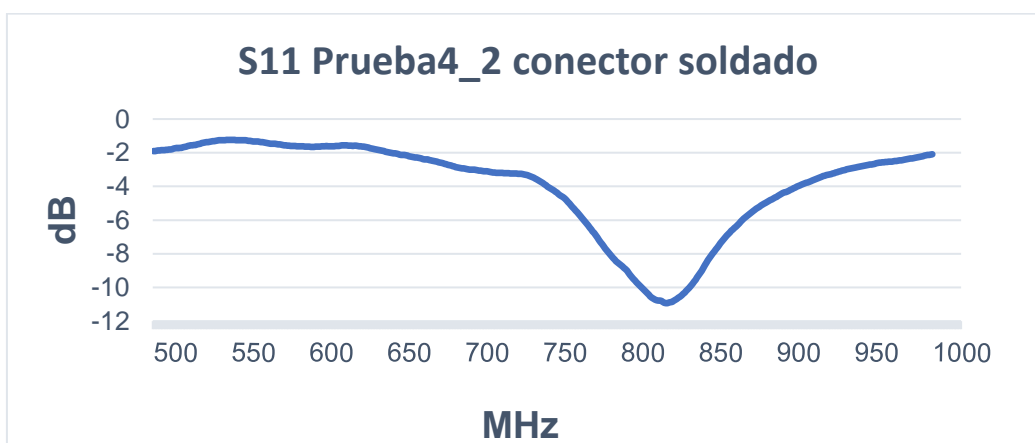
conector soldado. Aún y así, sus resultados respecto los ideales, han variado mucho.



*Figura 81: Ganancia de la antena Prueba4 hilo metálico a arriba en la máquina de coser*

En 729MHz que es la frecuencia a la que radia la antena, lo que resulta - 11.42dB, esta será su ganancia en esa frecuencia, en los resultados teóricos su ganancia era de 1.62dB. Aún y así, donde aparece la ganancia máxima es en 907MHz, una frecuencia parecida a la que habíamos valorado en la simulación, 868MHz.

Como podemos ver, estos resultados son muy poco parecidos a los de la simulación, esto podría ser a causa del conector, al estar soldado y con un cable, afecta en la medida, aparte de que, en la simulación, utilizábamos un material metálico ideal.



*Figura 82: Resultado parámetro S11 Prueba4 hilo metálico a abajo en la máquina de coser*

La asignada Prueba4\_2, es la prueba4 con el hilo en la parte inferior de la máquina de coser a la hora de haber bordado la antena, tiene unos resultados

de -10.931dB a 829MHz, de tal forma que los resultados son mejores que sin haber soldado la antena y, además, sin el conector soldado aparecía un segundo pico no deseado y en este caso no. Este será el mejor resultado obtenido de las tres antenas bordadas.

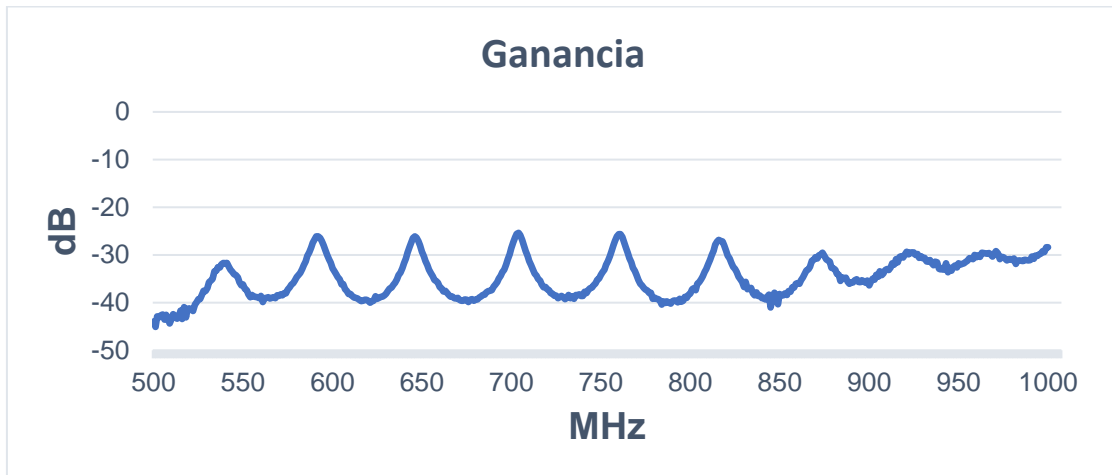


Figura 83: Resultado ganancia Prueba4 hilo metálico a abajo en la máquina de coser

En este caso, en la Figura 83 podemos observar diferentes puntos donde la ganancia es máxima, al contrario que en los resultados de la simulación, y en la frecuencia 829MHz obtenemos una ganancia de -35.56dB, un resultado completamente diferente a las condiciones iniciales.

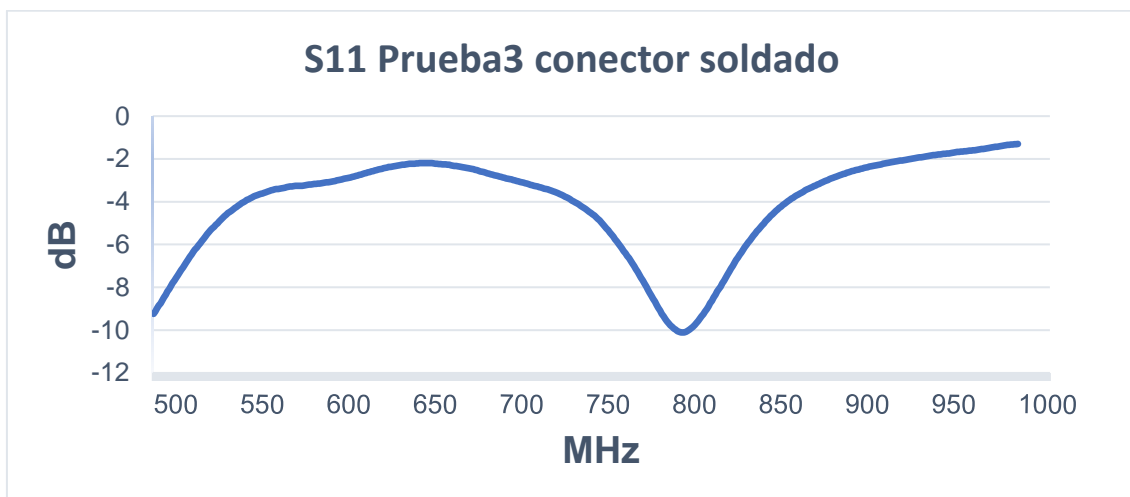
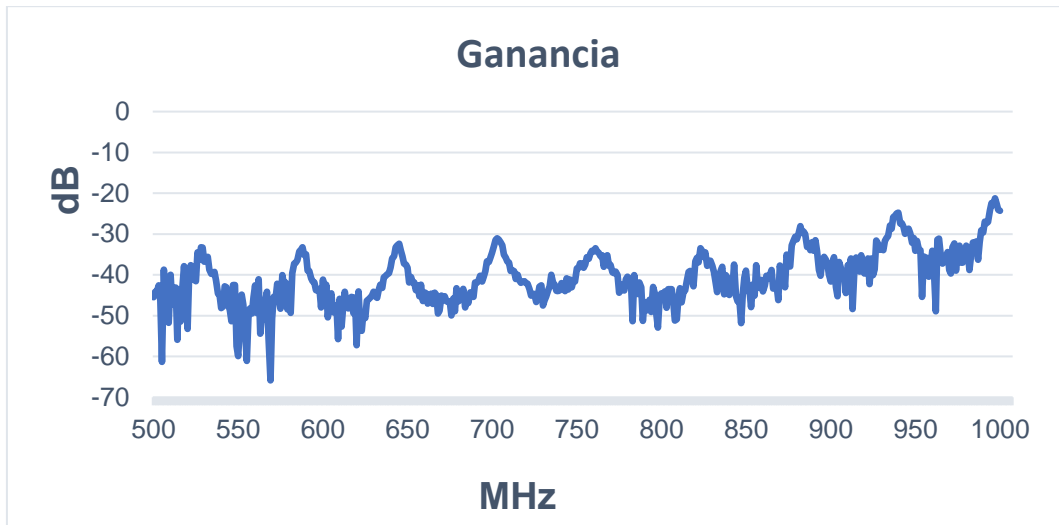


Figura 84: Resultado parámetro S11 Prueba3 hilo metálico a arriba en la máquina de coser

Por último, en la Prueba3 se han obtenido estos resultados: -10.107dB a 806MHz. Respecto a los resultados sin soldar el conector, han mejorado



mucho y se acercan mucho más a los teóricos, pero en este caso aparece un pico no deseado a una frecuencia inferior a 500MHz.



*Figura 85: Resultado ganancia Prueba3 hilo metálico a arriba en la máquina de coser*

En este último resultado de ganancia (Figura 85), obtenemos -50.85dB a la frecuencia que hemos podido comprobar con el analizador, 806MHz, al igual que el anterior, un resultado nada parecido al ideal.

## 6. Cronograma

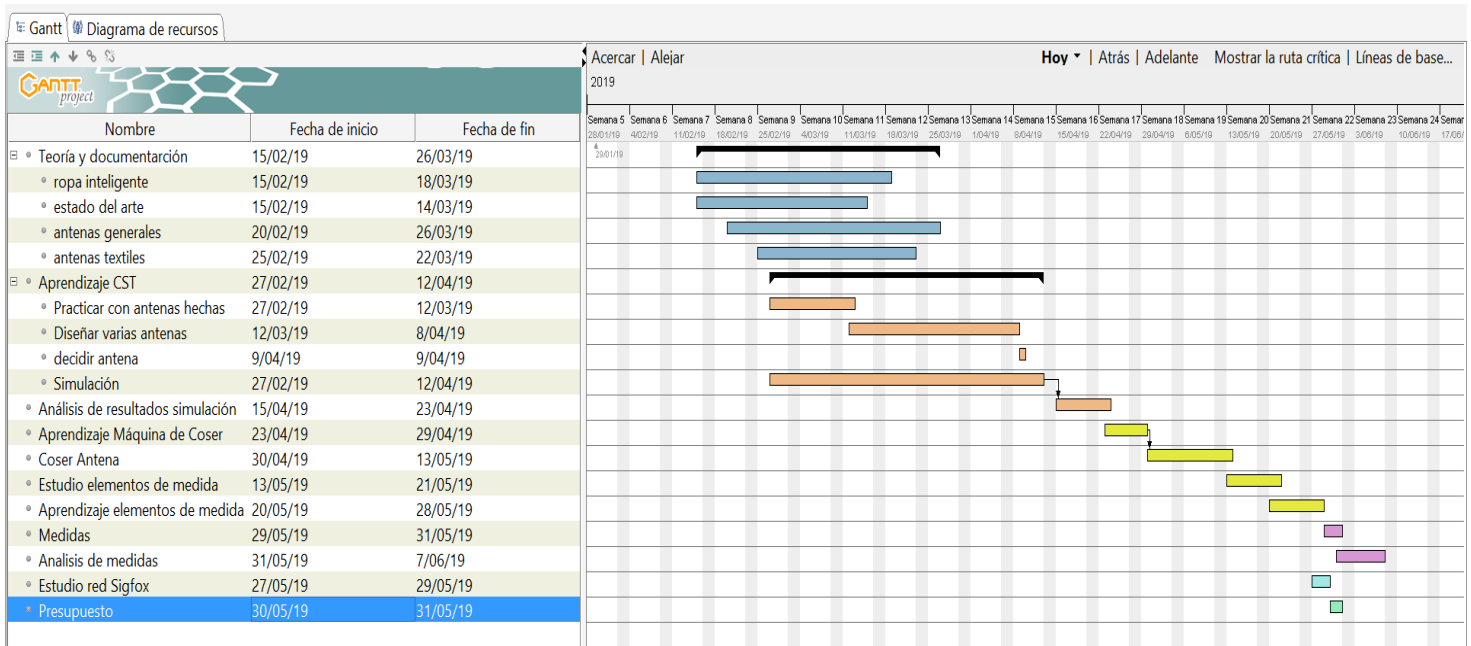


Figura 86: Diagrama de Gantt

Para poder producir un buen proyecto, se tienen que tener unas fechas límites claras en el proyecto, este Diagrama de Gantt, Figura 86, fue realizado al principio del trabajo para poderse organizar durante el cuatrimestre. Para el aprendizaje del software CST no se tardó tanto como se predecía, pero en cambio, en simular los resultados del SAR se tardó más de dos semanas, debido al gran tiempo computacional que requería cada sujeto. Igual que en coser la antena, que se tardaron unas horas, pero para mejorar los resultados con el analizador, se tardó tres semanas.

Finalmente, los resultados respecto a trabajo, tiempo y dedicación, han sido muy satisfactorios.

## 7. Presupuesto

A continuación, en la Tabla 10: Presupuesto Tabla 10 se presenta un presupuesto orientado al diseño de la antena, caracterización y materiales utilizados tanto software como maquinaria y dedicación del ingeniero.

Tabla de Presupuesto	
Materiales	
Tejano	20 €
Hilo de Plata	488,19€/ovillo
Cable de cobre	22,17 €/1430m
Estaño	7,92€/100gr
Conectores	2,02€
Cinta adhesiva de cobre	22,30€
Software	
CST Studio Suite	2.500€
Digitizer Ex	310€
GerbView	75,56€
Equipamiento	
Singer Futura XL-550	1.450€
Soldador	18,99€
PC	1.899€
Cámara anecoica RF Diagnostic Chamber ROHDE & SCHWARZ	19.320€
Fieldfox N9916A Microwave analyzer	15.461€
Tenma	164,56 €
Calibration Kit, Agilent Technologies CalKit 85521A	3.233€
Horas del ingeniero	
700 h aproximadamente a 10 €/h	7.000€
<b>TOTAL</b>	<b>51.994,71€</b>

Tabla 10: Presupuesto

## 8. Aspectos

### 8.1 Aspectos ambientales

El deterioro y la decaída del medio ambiente debido a las formas de vida de la sociedad en la actualidad, provocan un daño cada vez mayor en nuestro planeta, por ende, debemos tomar conciencia y responsabilidad de esta situación y ser proactivos para reparar los daños y evitar mayores, tanto de forma individual, como colectiva.

El hilo de plata utilizado es un hilo muy resistente, flexible y muy duradero, por lo que una vez cosida la antena en la prenda de ropa, esta puede durar años e incluso siglos, pudiéndose reutilizar en otras personas. Además, la prenda con la antena integrada, se puede lavar y mojar, sin padecer modificación alguna, proporcionando características muy interesantes para su uso y vida útil.

La red que está pensada para que utilice esta antena, también evita daños medioambientales ya que alarga la vida útil de los dispositivos debido a su larga duración.

Si hacemos una comparativa en el ámbito de las telecomunicaciones, la antena consta simplemente de hilo de plata y un conductor, por lo que contaminará mucho menos que las típicas antenas ya que se confeccionan con metales y su tamaño es muy grande.

### 8.2 Aspectos de seguridad

Como bien se ha explicado en el trabajo, con el software CST Studio, se comprobó que estuviera dentro de los límites legales que establecen los gobiernos, respecto a la tasa de absorción específica (SAR), y que, por tanto, la potencia máxima con que el campo electromagnético de radiofrecuencia es absorbido por el tejido del cuerpo humano, estará muy por debajo del máximo permitido. Finalmente, podemos considerar nuestra antena totalmente segura, pues los teléfonos móviles, por ejemplo, los llevamos constantemente en el bolsillo y no se ha demostrado que perjudiquen al ser humano, nuestra antena radiará mucho menos y será como si también la lleváramos en el bolsillo. Aún y así, no se podrá aplicar ni generalizar los resultados de este tipo de antena estudiada a otras parecidas, ya que la precisión del rendimiento cerca del cuerpo, debe ser verificado mediante mediciones con un modelo humano real.

## 9. Conclusiones

Nuestro objetivo era diseñar, simular, llevar a cabo y medir una antena textil, aplicarla a una prenda de ropa y que a su vez vista una persona, podemos decir como resultado que se han cumplido todos los campos y requerimientos propuestos en el estudio.

En este proyecto se han diseñado varias antenas planares MIFA destinadas a trabajar en la banda ISM y finalmente se han simulado los dos mejores prototipos.

Respecto a la simulación las dos antenas, se han obtenido muy buenos resultados para las medidas de las antenas, ya que, por ejemplo, la antena que se había escogido de base, tenía un tamaño superior al doble de las diseñadas en este proyecto y los resultados eran muy buenos. Todos los resultados han sido muy positivos, el parámetro S11 es un ejemplo de ello como la ganancia, eficiencia, SAR, etc. Incluso en diferentes casos que se ha moldeado la antena con el cilindro vacío, las antenas seguían dando buenos resultados.

Se han bordado las dos antenas con facilidad con la máquina de coser proporcionada por la universidad, con esto y las simulaciones podemos decir que es perfectamente adaptable y se puede integrar en un sustrato textil, sin que pierda estética o forma.

En el caso práctico, no se han cumplido exactamente las expectativas, aunque se ha estado muy cerca en el parámetro S11 y en la Ganancia, en algunos casos.

También se han cumplido los límites establecidos por los gobiernos del SAR, en diferentes biomodelos.

Finalmente, con los resultados obtenidos y viendo como las antenas reaccionan a la práctica, hemos decidido que la versión Prueba4 bordada con el hilo en la parte inferior, es la mejor. Se esperaba que fuera la Prueba3 debido a su robustez por ser más grande y tener una ganancia mejor que la anterior, pero da mejores resultados la Prueba4 a la práctica.

## 10. Futuros Estudios

En el ámbito de las antenas textiles, hay muy poca información y estudios, comparado con otros campos, por lo que tiene un gran potencial para ser explorado.

Como hemos podido comprobar, la antena a la práctica no se comporta como en la teoría, por tanto, un posible futuro estudio sería rediseñar la antena para que en la práctica trabajara a una frecuencia de 868MHz, volver a hacer todas las simulaciones y medidas. Aparte del procedimiento explicado

en el proyecto, una vez soldado el conector, se podrían hacer pruebas en la cámara anecoica girando la antena.

También se podría modificar la distancia entre el *feed* y el *ground* para no tener que soldar en esas partes porque todo lo que se le añade a la antena, como ha sido el caso de la cinta adhesiva de cobre y el estaño o el cable del conector, afecta en sus medidas. También se debería medir con la antena colocada encima de un cuerpo humano y probar en diferentes partes del cuerpo.

Otro posible estudio futuro es comprobar si en diferentes lavados, la antena varía o sigue teniendo las mismas características. Asimismo, comprobarlo igual, en diferentes condiciones ambientales.

Otra opción, siempre y cuando la antena esté bien rediseñada, es probarla para fines de conexión Wireless dedicada a posibles aplicaciones, por ejemplo, la geolocalización de un sujeto, como se proponía en el proyecto.

## 11. Bibliografía

[1]TEXTILES INTELIGENTES Y SOLUCIONES TIC - Aitex

<http://www.aitex.es/gi-textiles-inteligentes/>

[2]N+1; Autor: Victor Ramón; Ropa inteligente: estas son las 7 prendas más interesantes en el mercado.

<https://nmas1.org/news/2018/08/15/ropa-inteligente-tecnologia>

[3]Antenas cosidas en la ropa mejoran señal - Avances Tecnológicos

<https://www.euroresidentes.com/tecnologia/avances-tecnologicos/ropa-con-antenas>

[4]Crean antenas que se pueden coser en la ropa

<http://tecnologia21.com/crean-antenas-coser-ropa>

[5]¿Y si la tela de nuestra ropa fuera como la pantalla táctil de los móviles? Llega la revolución tecnológica al mundo de la moda

[https://www.antena3.com/especiales/a3tech/cazadoras-con-calefaccion-y-tejidos-que-son-una-pantalla-tactil\\_20170210589e24d80cf2d2743df1f4d3.html](https://www.antena3.com/especiales/a3tech/cazadoras-con-calefaccion-y-tejidos-que-son-una-pantalla-tactil_20170210589e24d80cf2d2743df1f4d3.html)

[6]Espectro Radioeléctrico

<http://www.conatel.gob.ve/espectro-radioelectrico/>

[7]Ferrando M, Valero A. Valencia; 2019.

[http://www.upv.es/antenas/Documentos\\_PDF/Notas\\_clase/Tema\\_1.PDF](http://www.upv.es/antenas/Documentos_PDF/Notas_clase/Tema_1.PDF)

[8]¿Qué tipos de antenas existen?

<http://soporte.syscom.mx/radiocomunicacion/que-tipos-de-antenas-existen>

[8]4. Huidobro J.; 2019.

[https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias\\_y\\_tecnologia/020001.pdf](https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/020001.pdf)

[10]Teoría de Antenas - Radiocomunicaciones Blog Técnico

<http://www.radiocomunicaciones.net/radio/teoria-de-antenas/>

[11] De M<sup>a</sup> Luisa Bello

<http://www.ikusi.es/documentos/fotos/modelos/220.jpg>, CC BY-SA 4.0,  
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3765538>

[12]Storage.sbg1.cloud.ovh.net

[https://storage.sbg1.cloud.ovh.net/v1/AUTH\\_669d7dfced0b44518cb186841d7cbd75/dev\\_medias/build\\_Antenna%20design%20for%20Sigfox-Ready%20devices.pdf](https://storage.sbg1.cloud.ovh.net/v1/AUTH_669d7dfced0b44518cb186841d7cbd75/dev_medias/build_Antenna%20design%20for%20Sigfox-Ready%20devices.pdf)

[13]Así es SIGFOX, la red alternativa para el Internet de las cosas - Nobbott

<https://www.nobbott.com/redes/sigfox-la-red-para-el-internet-de-las-cosas/>

[14]Xiaoming Tao. *Handbook of Smart Textiles*. Singapur: Springer Verlag, 2015. ISBN 978-981-4451-44-4.

[15]McCann, J., & Bryson, D. (2009). *Smart clothes and wearable technology*. Oxford...  
[et al.]: Woodhead Publishing. ISBN 9781845693572.

[16]Wndw.net

<http://wndw.net/pdf/wndw3-es/wndw3-es-ebook.pdf>

[17]VSWR

<http://www.antenna-theory.com/definitions/vswr.php>

[18]Parámetros fundamentales en Antenas - Monografias.com

<https://www.monografias.com/trabajos98/parametros-fundamentales-antenas/parametros-fundamentales-antenas.shtml>

[19]Parámetros de una antena - Equipos de imagen

<https://sites.google.com/site/equiposdeimagengmfp/1-transmision-de-television/2-antenas-de-television/parametros-de-una-antena>

[20]Tasa de absorción específica

[https://es.wikipedia.org/wiki/Tasa\\_de\\_absorción\\_específica](https://es.wikipedia.org/wiki/Tasa_de_absorción_específica)



[21]Technical Data Sheet Shieldex Conductive Twisted Yarn

<https://www.shieldextrading.net/>

[22]CST Studio Suite – 3D EM analysis software - SIMULIA by Dassault Systèmes

<https://www.cst.com/products/csts2>

[23]CST MICROWAVE STUDIO 3D EM Simulation Software

<https://www.cst.com/products/cstmws>

[24]GerbView - View and convert Gerber, Excellon and PDF. Convert to DXF, PDF, TIFF and Gerber.

<https://www.gerbview.com/>

[25]XL-550 | SINGER Futura Support

<http://futura-support.com/products/xl-550>

[26]R&S®DST200 RF Diagnostic Chamber - Información general

[https://www.rohde-schwarz.com/es/producto/dst200-pagina-de-inicio-producto\\_63493-11087.html](https://www.rohde-schwarz.com/es/producto/dst200-pagina-de-inicio-producto_63493-11087.html)

[27]Cámara anecoica

[https://es.wikipedia.org/wiki/Cámara\\_anecoica](https://es.wikipedia.org/wiki/Cámara_anecoica)

[28]N9916A FieldFox Handheld Microwave Analyzer, 14 GHz | Keysight (formerly Agilent's Electronic Measurement)

<https://www.keysight.com/en/pdx-x201925-pn-N9916A/fieldfox-handheld-microwave-analyzer-14-ghz?cc=ES&lc=eng>

[29]Antena F invertida

[https://ca.wikipedia.org/wiki/Antena\\_F\\_invertida](https://ca.wikipedia.org/wiki/Antena_F_invertida)

[30]PIFA ProAnt - Antenas planares con forma de F invertida | DigiKey

<https://www.digikey.es/es/blog/proant-pifas-planar-inverted-f-antennas>

[31]By Courtesy Spinningspark at Wikipedia, CC BY-SA 3.0  
<https://en.wikipedia.org/w/index.php?curid=48393433>

[32]Diseño y caracterización de una antena textile en la banda ISM  
Maite.navas\_122848.pdf

## ANEXO 1: TERMS OF REFERENCE

En este anexo se mostrarán los requerimientos técnicos de la antena y las medidas utilizadas para realizar las antenas. Todo lo explicado en el siguiente anexo, está explicado y citado en el trabajo de manera extensa. Se mostrará un pequeño resumen de los objetivos, requerimientos, normativa y estructura.

### Objetivo

El propósito principal de este proyecto es diseñar, simular, llevar a cabo y medir una antena wereable Sigfox, tipo textil, con el objetivo de integrarla en una prenda de ropa que a su vez vista una persona, todo ello con la finalidad de obtener la conexión de los objetos cotidianos a internet, con diferentes aplicaciones. La antena estará ubicada en la parte superior de la pierna.

Se simularán todos los parámetros con una banda de frecuencia ISM a 868 MHz para poderlo conectar a la red Sigfox, además del SAR. Después, se bordará la antena con hilo de plata en un sustrato de tejano, teniendo en cuenta los límites ya establecidos del campo eléctrico inducido radiado que acepta el cuerpo humano. Finalmente, se compararán y analizarán los resultados teóricos con las medidas tomadas con el equipamiento adecuado.

### Requerimientos

Nuestra antena, a grandes rasgos, deberá cumplir con las especificaciones del parámetro S11, es decir que en la representación gráfica se observe un pico en la frecuencia elegida (868MHz) y tenga un valor por debajo de -10dB, además de una buena eficiencia y que su tasa de absorción corporal este dentro de los límites establecidos por cada gobierno. Asimismo, para que la antena pueda ser útil y eficaz, deberemos tener la máxima ganancia posible y obtener un valor de directividad parecido al de la ganancia. También se ha propuesto que su tamaño no supere los 15 cm de largo.

Respecto al SAR, estará por debajo de 2W/Kg en 10g y 1.6W/Kg en 1g.

## Ficha técnica

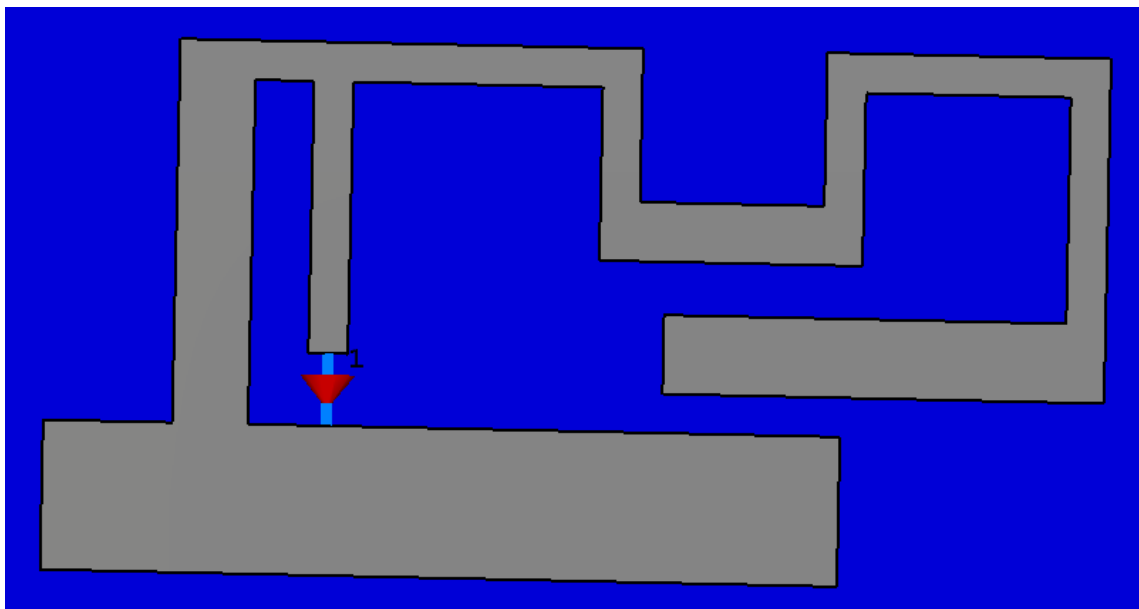
### Materiales

El tejano o denim es una tela de algodón asargado de trama blanca teñida de azul índigo. Es una tela pesada y durable que absorbe la transpiración y la humedad fácilmente Tabla 1: Características del tejido del tejano.

Hilo conductor de Plata, su propósito principal: aplicaciones para eliminar o inhibir el crecimiento de microorganismos para prendas de vestir, textiles inteligentes e hilo de coser.

- Descripción: 99% hilo de Nylon plateado puro 140/17 dtex
- Resistencia:  $<30\Omega$  / cm
- Rendimiento: 35,000 M / Kg.
- Tenacidad: Promedio 70 cN / tex.
- Alargamiento: abt. 40%
- Punto de fusión (F): 492

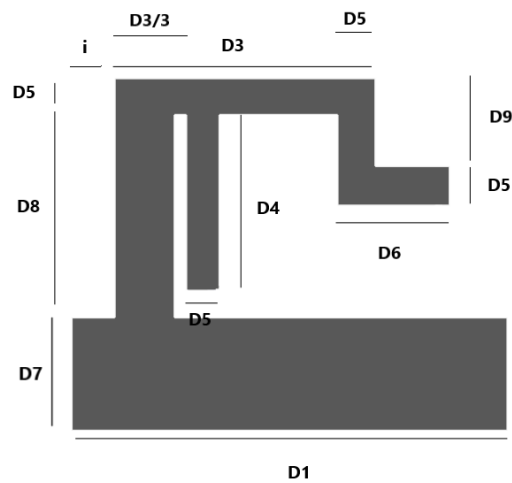
### Estructura



*Figura 87: Esquema de la antena Prueba3*

La altura del material metálico es de 0.7mm.

## Prueba4



*Figura 88: Plano de la estructura de la antena Prueba4*

Prueba4	mm
D1	80
D3	49
D4	39.91
D5	6.1
D6	10.8
D7	24
D8	48.35
D9	28
i	8

*Tabla 11: Medidas de los parámetros de la antena Prueba4*

Los dos puertos tendrán una impedancia de 50 Ohm.

Puerto Prueba4: 6.35mm

## Prueba3

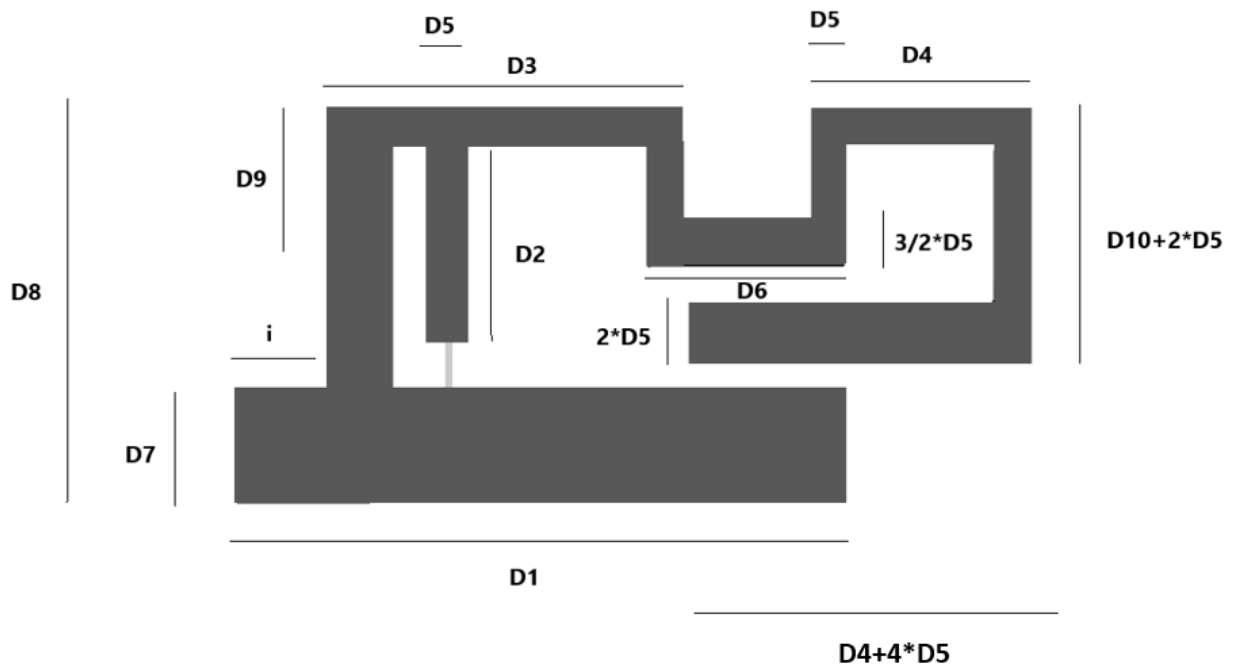


Figura 89: Plano de la estructura Prueba4

Prueba 3 mm	
D1	105
D2	41.03
D3	61
D4	37.4
D5	5.2
D6	34.7
D7	19.71
D8	45.35
D9	28
D10	35
i	17

Tabla 12: medidas de los parámetros Prueba3

Puerto Prueba3: 9.6mm